

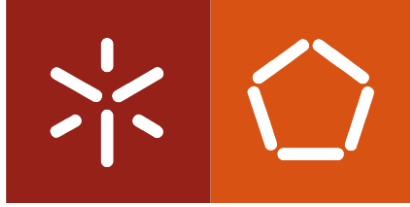
Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Cláudia Isabel Gonçalves Ferreira

Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas

Dezembro de 2009



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Cláudia Isabel Gonçalves Ferreira

Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil
Área de Especialização Engenharia Rodoviária

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias Silva

Dezembro de 2009

DEDICATÓRIA

Desejo dedicar esta dissertação aos meus pais.

Sem o seu infindável amor e incondicional apoio nunca teria chegado onde me encontro hoje.

AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho só foi possível devido a um conjunto de condições e meios postos à disposição, bem como à dedicação, empenho e vontade de vários intervenientes, a quem gostaria de expressar os meus mais profundos e sinceros agradecimentos.

À Universidade do Minho, pelos meios e condições postos à disposição e principalmente ao Sr. Professor Doutor Paulo Pereira cujo empurrão na altura certa fez toda a diferença.

Ao meu orientador Doutor Engenheiro Hugo Silva, quero expressar o meu enorme reconhecimento pela ajuda, apoio e estímulo manifestados desde sempre, bem como pelos conhecimentos e orientações incondicionalmente transmitidos.

Ao Doutor Engenheiro Joel Oliveira e ao Engenheiro Carlos Palha, respectivamente do Grupo de Vias de Comunicação e Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, pela dedicação e empreendedorismo que colocaram em tudo o que me ajudaram a fazer.

Às minhas queridas amigas Doutoradas Engenheiras Maria de Lurdes Antunes e Fátima Batista quero agradecer o encorajamento e a amizade com que me acompanharam, e o interesse com que assistiram a esta investigação. Ao LNEC, o qual também representam, um reconhecimento especial pelos meios técnicos postos à disposição.

Ao Engenheiro Carlos Couto pela confiança e apoio depositados, e por desde sempre ter conseguido que a Gabriel Couto fosse a minha segunda casa e a minha principal escola.

A todos os colegas, e mais que isso, amigos, Engenheiros João Morgado, Pereira da Silva, Tiago Couto, José Vieira, Daniel Costa, Jorge Seabra, João Pedro Moreira e Eurico Feiteira, pelo incansável apoio, que mais não fosse, e por vezes o mais importante, apoio moral. Ao Sr. e Mestre Veiga pela ajuda e ensinamentos preciosos de todos estes anos, e a todos os técnicos do “meu” laboratório, chefiado por alguém para quem vai um carinho muito especial, o Paulo Ferreira, e que participaram tão activamente e sempre tão disponíveis, o Rui, o Vítor, o Flávio e a Bernardete.

À Eng.^a Maria Seabra pelo incansável apoio técnico e por vezes abdicar das suas tarefas em detrimento da ajuda imprescindível que me dedicou, sempre com boa vontade e um sorriso no rosto.

Às melhores amigas e companheiras de “guerra” Maria, Catarina, Ró e Carlinha.

Ao meu tio Orlando, tio especial e colega de profissão, responsável por eu ter enveredado pela Engenharia, e a quem devo também o gosto pelas misturas betuminosas.

Ao meu irmão e às minhas irmãs do coração, Luís, Susana e Catarina.

E principalmente aos dois seres maravilhosos, a minha maior obra-prima, donos do meu amor incondicional, e que tantas vezes lesei para que isto fosse possível, os meus filhinhos a Mi e o Joãozinho.

Para a minha paixão, equilíbrio e inspiração. Para o Paulo.

*O homem molda-se a si próprio através das decisões com
que molda o seu ambiente.*

René Dubos

Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas

RESUMO

O acrescido enfoque que tem vindo a ser dado ao uso racional da energia e à pegada de carbono estimula o interesse nas novas tecnologias para redução dos consumos, – menos energia / menos CO₂ – e o *procurement* para encorajar a sua utilização. As Misturas Betuminosas Temperadas (MBT) assumem cada vez mais uma notoriedade inequívoca, traduzindo-se como uma das respostas adequadas do sector de produtores das misturas betuminosas a este repto. Actualmente, para que as MBT possam ser aceites por todos os intervenientes rodoviários, é um requisito essencial comprovar que o seu desempenho mecânico é idêntico ao obtido com o mesmo tipo de mistura betuminosa fabricada a quente.

Assim, o objectivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa do desempenho (em laboratório e num trecho experimental) de uma mistura betuminosa produzida a temperaturas convencionais, e da mesma mistura produzida com duas diferentes tecnologias para produção de MBT, nomeadamente através da introdução de dois aditivos distintos (ceras sintéticas e agentes de superfície) que permitem realizar a mistura a menor temperatura (120 a 140 °C).

Neste trabalho faz-se um enquadramento temático, abordando os benefícios e a história recente das MBT e descrevendo as diferentes tecnologias e técnicas de produção das mesmas. Em seguida, apresenta-se a caracterização laboratorial para avaliação comparativa das diferentes propriedades das misturas convencional e temperadas. Realça-se o trabalho realizado para a caracterização do ligante e restantes materiais constituintes, a metodologia de formulação das misturas betuminosas e o método utilizado para definir a quantidade óptima de aditivo e a redução de temperatura de fabrico. Por último, são descritos os procedimentos relativos à validação na produção, à execução do trecho experimental, à avaliação do desempenho das misturas *in situ* e à avaliação estrutural e funcional do trecho, sendo feita uma sumária análise económica do custo comparativo entre as três misturas estudadas.

Apresentam-se no final os aspectos mais relevantes de todo o trabalho, e são elencadas as principais conclusões do mesmo. Concluiu-se que as MBT têm potencialmente o mesmo desempenho das misturas convencionais a quente, embora careçam de um cuidado acrescido na sua produção. Assim, deve ser implementado um controlo da qualidade mais rigoroso na fase de produção e aplicação das misturas betuminosas temperadas.

Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas

PALAVRAS-CHAVE

Redução das emissões
Misturas betuminosas temperadas
Aditivos
Ligante
Viscosidade
Compactabilidade
Temperatura
Trecho experimental
Desempenho
Benefícios ambientais e socioeconómicos

Evaluation of the Performance of Warm Mix Asphalts

ABSTRACT

The increased focus that has been given to the rational use of energy and carbon footprint stimulates the interest in new technologies to reduce consumption – less energy / less CO₂ – and procurement to encourage their use. The Warm Mix Asphalt (WMA) are increasingly acquiring an unequivocal reputation, thus becoming one of the appropriate answers of the producers of bituminous mixtures to that challenge. Presently, in order that the WMA can be accepted by all road intervenients, it is essential to ensure that their mechanical performance is identical to that obtained with the same type of asphalt mix produced at high temperatures.

Thus, the aim of this work is to carry out a comparative analysis of the performance (in lab and in an experimental trial) of an asphalt mixture produced at conventional temperatures, and the same mixture produced by using two different technologies to produce WMAs, including the introduction of two different additives (synthetic waxes and surfactants) that allow to produce the mixture at lower temperatures (120 to 140 °C).

This dissertation presents a thematic context, addressing the benefits and the recent history of WMAs and describing the different technologies and techniques for their production. Then, a laboratorial characterization of the mixtures is presented for a comparative assessment of the different properties of the conventional and warm mixtures. The work carried out to characterize the binder and the other constituent materials should be emphasized, as well as the mix design methodology and the method used to define the optimum amount of additive and the reduction of the production temperature. At last, the procedures used for asphalt production validation, construction of the experimental trial, evaluation of in situ performance of the mixtures and structural and functional evaluation of the trial are described, and a brief economic analysis was done to compare the costs of the three studied mixtures.

Finally, the most important aspects of this work are presented, and its main findings are listed. It was concluded that the WMA potentially have the same performance of the conventional hot mix asphalt, but they need additional attention during their production. Thus, a more stringent quality control should be implemented during the phases of production and laying down of the warm mix asphalts.

Evaluation of the Performance of Warm Mix Asphalts

KEYWORDS

Emission reduction

Warm mix asphalt

Additives

Bitumen

Viscosity

Compactability

Temperature

Experimental trial

Performance

Environment, economic and social benefits

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento Temático	1
1.2. Objectivos	3
1.3. Conteúdo da Tese e Metodologia	4
2. ESTADO DA ARTE SOBRE MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS	7
2.1. Introdução	7
2.2. Benefícios da Utilização de Misturas Betuminosas Temperadas	8
2.2.1. Benefícios Sociais	9
2.2.2. Benefícios Económicos	10
2.2.3. Benefícios Ambientais	10
2.3. Breve História das Misturas Betuminosas Temperadas	11
2.4. Tecnologias para Produção de Misturas Betuminosas Temperadas	14
2.4.1. Aditivos Orgânicos	17
2.4.2. Aditivos Químicos	19
2.4.3. Espuma de Betume com Minerais Sintéticos ou Naturais	22
2.4.4. Espuma de Betume por Injecção de Água	24
3. ESTUDO DA COMPOSIÇÃO E DO DESEMPENHO LABORATORIAL DAS MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS	33
3.1. Introdução	33
3.2. Caracterização dos Ligantes Betuminosos	34
3.2.1. Descrição Inicial do Estudo	34
3.2.2. Selecção dos Ligantes e dos Aditivos a Utilizar	34
3.2.3. Propriedades Básicas dos Ligantes	36
3.2.4. Viscosidade Dinâmica dos Ligantes (Viscosímetro Rotacional)	39
3.2.5. Propriedades Reológicas dos Ligantes (DSR)	42
3.2.6. Comparação dos Resultados da Viscosidade Dinâmica Determinados no Viscosímetro Rotacional e no DSR	49
3.3. Caracterização dos Agregados	50
3.3.1. Granulometria das Diversas Fracções de Agregados	50

3.3.2. Outras Características das Diversas Fracções de Agregados.....	51
3.3.3. Avaliação da Afinidade Agregado-Ligante	53
3.4. Formulação das Misturas Betuminosas.....	55
3.4.1. Introdução	55
3.4.2. Formulação da Mistura Betuminosa de Referência.....	56
3.4.3. Características Base da Mistura Betuminosa Formulada	56
3.4.4. Características da Mistura Betuminosa Obtidas no Estudo Complementar.....	58
3.5. Optimização da Temperatura de Fabrico das Misturas Betuminosas Temperadas	59
3.5.1. Ensaio de Compactabilidade com Diferentes Provetes para Cada Energia de Compactação	60
3.5.2. Ensaio de Compactabilidade com o Mesmo Provete para Diferentes Energias de Compactação.....	61
3.6. Caracterização Laboratorial das Misturas Betuminosas Temperadas.....	63
3.6.1. Análise de Composição e Volumétrica.....	63
3.6.2. Estudo da Sensibilidade à Água.....	65
3.6.3. Resistência à Deformação Permanente.....	66
3.6.4. Módulo de Rigidez.....	67
3.6.5. Resistência ao Fendilhamento por Fadiga	71
3.6.6. Conclusão.....	73
 4. VALIDAÇÃO NA PRODUÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS NO TRECHO EXPERIMENTAL.....	75
4.1. Considerações Preliminares ao Fabrico das Misturas	75
4.2. Produção das Misturas Betuminosas.....	77
4.3. Método Construtivo Utilizado no Trecho Experimental.....	79
4.4. Características Finais das Misturas Betuminosas Aplicadas no Trecho	82
4.4.1. Análise de Composição e Volumétrica.....	82
4.4.2. Estudo da Sensibilidade à Água.....	83
4.4.3. Resistência à Deformação Permanente.....	84
4.4.4. Análise do Problema de Contaminação com Fuel	85
4.4.5. Módulo de Rigidez.....	86
4.4.6. Resistência ao Fendilhamento por Fadiga	87

4.4.7. Caracterização do Betume Recuperado.....	89
4.5. Caracterização Estrutural do Trecho Experimental.....	90
4.5.1. Descrição da Localização dos Sub-trechos Efectuados com as Misturas em Estudo.....	90
4.5.2. Ensaios de Capacidade de Carga Efectuados Antes de Aplicar a Camada de Desgaste.....	90
4.5.3. Ensaios de Capacidade de Carga Efectuados Depois de Aplicar a Camada de Desgaste.....	92
4.6. Caracterização Funcional do Trecho Experimental.....	94
4.6.1. Introdução e Descrição do Equipamento Utilizado.....	94
4.6.2. Caracterização da Regularidade Longitudinal	95
4.6.3. Caracterização da Textura	100
4.7. Análise Económica da Aplicação de Misturas Betuminosas Temperadas	104
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS	109
5.1. Introdução	109
5.2. Conclusões	110
5.3. Trabalhos Futuros	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Desenvolvimento sustentável.....	8
Figura 2.2 – Um pequeno apontamento da história das misturas betuminosas temperadas	12
Figura 2.3 – Resumo da história das misturas betuminosas temperadas.....	14
Figura 2.4 – Classificação das tecnologias de produção de misturas betuminosas em função da temperatura de produção (adaptado de FHWA, 2008).....	14
Figura 2.5 – Técnicas de produção das misturas betuminosas temperadas.....	15
Figura 2.6 – Tecnologia de fabrico das misturas betuminosas temperadas em função da temperatura de produção	17
Figura 2.7 – Duas formas de apresentação do aditivo Sasobit® (Hurley and Prowell, 2008)	18
Figura 2.8 – Pastilhas de Rediset®	21
Figura 2.9 – Zeólitos sintéticos Aspha-min® (esquerda) e Advera® (direita)	23
Figura 2.10 – Sistema automático de introdução do Aspha-Min®	24
Figura 2.11 – Misturadora para adição de zeólitos (adaptado de EAPA, 2007)	24
Figura 2.12 – O processo de produção de WMA-Foam®	25
Figura 2.13 – Unidade de produção de espuma (adaptado de EAPA, 2007)	26
Figura 2.14 – Double Barrel com opção Green e unidade de produção de espuma (adaptado de ASTEC, 2009)	27
Figura 2.15 – Processo de produção das LEA (adaptado de FHWA, 2008).....	28
Figura 2.16 – Produção de LEA em central descontínua (adaptado Lea-co, 2010).....	28
Figura 2.17 – Serie de 6 bicos retrateis de injeção de espuma da BAM: LEAB® (adaptado de FHWA, 2008).....	30
Figura 2.18 – Dispositivo para execução da espuma de betume da Gencor (adaptado de Gencor, 2009).....	31
Figura 3.1 – Evolução do valor da penetração do ligante com o incremento de aditivo	37
Figura 3.2 – Evolução do ponto de amolecimento do ligante com o incremento de aditivo	37

Figura 3.3 – Influência da quantidade e tipo de aditivo no valor da penetração dos ligantes.....	38
Figura 3.4 – Influência da quantidade e tipo de aditivo no ponto de amolecimento do ligante	38
Figura 3.5 – Variação dos valores de penetração e ponto de amolecimento dos ligantes.....	38
Figura 3.6 – Método utilizado para determinar a viscosidade a diferentes temperaturas com o viscosímetro rotacional	40
Figura 3.7 – Viscosidade dinâmica dos ligantes com Sasobit [®] (viscosímetro rotacional).....	40
Figura 3.8 – Viscosidade dinâmica dos ligantes com Cecabase [®] (viscosímetro rotacional).....	41
Figura 3.9 – Módulo complexo de um ligante modificado com Sasobit [®] a diferentes temperaturas e frequências (DSR)	43
Figura 3.10 – Ângulo de fase de um ligante modificado com Sasobit [®] a diferentes temperaturas e frequências (DSR).....	44
Figura 3.11 – Viscosidade de um ligante modificado com Sasobit [®] a diferentes temperaturas e frequências (DSR).....	44
Figura 3.12 – Influencia da quantidade de Sasobit [®] nas propriedades reológicas do ligante (DSR).....	46
Figura 3.13 – Propriedades reológicas do betume B35/50 vs betume B50/70 modificado com Sasobit [®] (DSR).....	47
Figura 3.14 – Propriedades reológicas do betume B50/70 vs betume B100/150 modificado com Sasobit [®] (DSR).....	47
Figura 3.15 – Apresentação gráfica do estudo dos ligantes baseado nas suas propriedades reológicas (DSR)	48
Figura 3.16 – Relação entre viscosidades medidas no viscosímetro rotacional e no DSR	49
Figura 3.17 – Curva granulométrica dos agregados utilizados no presente estudo.....	51
Figura 3.18 – Resultados dos ensaios da afinidade agregado-betume para os ligantes estudados	54
Figura 3.19 – Curva granulométrica da mistura de agregados do AC14 Surf e fuso granulométrico adoptado	57

Figura 3.20 – Resultados da compactabilidade a diferentes temperaturas e com diferentes provetes (Sasobit na esquerda e Cecabase na direita).....	60
Figura 3.21 – Resultados da compactabilidade a diferentes temperaturas e com o mesmo provete (Sasobit na esquerda e Cecabase na direita).....	62
Figura 3.22 – Compactação das misturas no molde com cilindro de rasto liso	64
Figura 3.23 – Esquema do ensaio para determinação da resistência à tracção indirecta.....	65
Figura 3.24 – Ensaio de pista para determinação da resistência à deformação permanente	66
Figura 3.25 – Esquema e foto do dispositivo para o ensaio de flexão em quatro pontos em provetes prismáticos (4PB-PR)	68
Figura 3.26 – Máquina para realização dos ensaios de módulo de rigidez e de fadiga em quatro pontos.....	69
Figura 3.27 – Variação do módulo de rigidez com a frequência para as misturas estudadas	70
Figura 3.28 – Variação do ângulo de fase com a frequência para as três misturas estudadas	70
Figura 3.29 – Definição da rotura em ensaios de flexão em 4 pontos com extensão controlada.....	71
Figura 3.30 – Leis de fadiga obtidas em laboratório para as misturas betuminosas em estudo	73
Figura 4.1 – Forma de acondicionamento e aspecto visual do Sasobit®	75
Figura 4.2 – Forma de acondicionamento e aspecto visual do Cecabase® RT 945	75
Figura 4.3 – Mistura do aditivo na cisterna de transporte	76
Figura 4.4 – Aspecto da central de fabrico das misturas.....	77
Figura 4.5 – Registo das temperaturas obtido directamente do equipamento da central de produção: a) mistura convencional; b) mistura com Sasobit®; c) mistura com Cecabase®	78
Figura 4.6 – Fumos observados na descarga das misturas betuminosas para o camião na central de produção: a) mistura convencional; b) MBT	79
Figura 4.7 – Equipamento utilizado na construção do trecho experimental: a) aplicação das misturas betuminosas; b) compactação	80

Figura 4.8 –	Temperaturas aproximadas a que foram compactadas as misturas betuminosas temperadas: a) com Sasobit®; b) com Cecabase®	81
Figura 4.9 –	Valores da resistência à deformação permanente de lajes produzidas em laboratório e retiradas após aplicação em obra.....	84
Figura 4.10 –	Variação do módulo de rigidez com a frequência para as três misturas aplicadas no trecho experimental	86
Figura 4.11 –	Variação do ângulo de fase com a frequência para as três misturas aplicadas no trecho experimental	87
Figura 4.12 –	Leis de fadiga obtidas para as misturas betuminosas colocadas no trecho	88
Figura 4.13 –	Localização GPS do trecho e das várias misturas betuminosas colocadas ao longo da sua extensão	90
Figura 4.14 –	Equipamento utilizado nos ensaios de capacidade de carga (FWD).....	91
Figura 4.15 –	Deflexões máximas do trecho e deflexões características dos sub-trechos antes de realizar a camada de desgaste	92
Figura 4.16 –	Deflexões máximas do trecho e deflexões características dos sub-trechos após realização da camada de desgaste.....	93
Figura 4.17 –	Equipamento usado para a medição do IRI e da MPD.....	95
Figura 4.18 –	Modelo conceptual para o cálculo do IRI (“quarto de veículo”).....	96
Figura 4.19 –	IRI por troços de 100 m no trecho experimental.....	98
Figura 4.20 –	Ilustração do princípio do método da mancha de areia	101
Figura 4.21 –	Ilustração dos termos comprimento de base, profundidade do perfil (PD), profundidade média do perfil (MPD)	102
Figura 4.22 –	Profundidade estimada da textura no trecho experimental em estudo	104

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Dados relativos à redução de emissões com as misturas betuminosas temperadas, em percentagem (adaptado de FHWA, 2008)	11
Quadro 2.2 – Resumo das principais tecnologias de produção de misturas betuminosas temperadas	16
Quadro 3.1 – Resultados comparativos das diferentes propriedades dos ligantes.....	36
Quadro 3.2 – Composição granulométrica das fracções de agregados.....	51
Quadro 3.3 – Características dos agregados utilizados.....	53
Quadro 3.4 – Percentagem de cada fracção de agregados utilizados na mistura betuminosa	57
Quadro 3.5 – Resumo das características volumétricas e de estabilidade da mistura	58
Quadro 3.6 – Resultados dos ensaios complementares para formulação da mistura.....	59
Quadro 3.7 – Resistência à compactação (EN 12697-10) obtida a diferentes temperaturas	62
Quadro 3.8 – Características das misturas resultantes do estudo laboratorial	64
Quadro 3.9 – Sensibilidade à água das misturas estudadas em laboratório.....	65
Quadro 3.10 – Resistência à deformação permanente das misturas no ensaio de pista.....	67
Quadro 4.1 – Características das carotes retiradas em obra.....	81
Quadro 4.2 – Características das misturas aplicadas no trecho experimental	82
Quadro 4.3 – Sensibilidade à água das misturas aplicadas no trecho experimental	83
Quadro 4.4 – Valores da resistência à deformação permanente de lajes retiradas do pavimento.....	84
Quadro 4.5 – Valores da resistência à deformação permanente (lajes moldadas em laboratório com betume recolhido em obra).....	85
Quadro 4.6 – Valores da caracterização dos ligantes antes e após recuperação.....	89
Quadro 4.7 – Relação entre os valores da deflexão nos sub-trechos antes e após construção da camada de desgaste	93
Quadro 4.8 – Classificação dos pavimentos com base no IRI.....	97
Quadro 4.9 – Valores admissíveis de IRI (m/km), calculados por troços de 100 metros em pavimentos com camadas de desgaste betuminosas	97

Quadro 4.10 – Valores de IRI obtidos no trecho experimental.....	98
Quadro 4.11 – Classificação da regularidade do trecho experimental com base no IRI.....	100
Quadro 4.12 – Singularidades observadas no trecho experimental.....	100
Quadro 4.13 – Limites mínimos de MTD para diferentes tipos de misturas betuminosas	103
Quadro 4.14 – Profundidade da textura no trecho experimental em estudo	103
Quadro 4.15 – Análise dos custos com o ligante	105
Quadro 4.16 – Análise dos custos com os agregados.....	106
Quadro 4.17 – Análise dos custos durante a fase de fabrico	106
Quadro 4.18 – Análise dos custos totais das misturas betuminosas.....	107

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

CE	–	Caderno de Encargos
CO	–	Monóxido de Carbono
CO ₂	–	Dióxido de Carbono
COV	–	Composto Orgânico Volátil
F-T	–	Fischer-Tropsch
NO _x	–	Óxidos de Nitrogénio (NO e NO ₂)
RA	–	Misturas Betuminosas a Recuperar (<i>Reclaimed Asphalt</i>)
SO ₂	–	Dióxido de Enxofre

ÍNDICE DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

AEMA	– Asphalt Emulsion Manufacturers Association
AIPCR	– Association Mondial de la Route
CAIR	– Clean Air Rules
DSR	– Dynamic Shear Rheometer
EAPA	– European Asphalt Pavement Association
EN	– European Norm
ETD	– Estimated Texture Depth
FHWA	– Federal Highway Administration
IRI	– International Roughness Indice
ITSR	– Indirect Tensile Strength Ratio
LEA	– Low Energy Asphalt
MBQ	– Mistura Betuminosa a Quente
MBT	– Mistura Betuminosa Temperada
MPD	– Mean Profile Depth
NAPA	– National Asphalt Pavement Association
NCAT	– National Center Asphalt Technology
NP EN	– Norma Portuguesa European Norm
UNFCCC	– United Nations Framework Convention on Climate Change
US EPA	– United States Environmental Protection Agency
WMA	– Warm Mix Asphalt
WRAP	– Waste and Research Action Program
WTS	– Wheel Tracking Slope

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento Temático

A diminuição do consumo de combustíveis e, conseqüentemente, das emissões de gases com efeitos de estufa, são um dos grandes desafios actuais da sociedade. No fabrico de misturas betuminosas a quente têm vindo a ser desenvolvidas de uma forma crescente um sem número de novas tecnologias visando a redução da sua temperatura de produção e aplicação em obra. Genericamente, estas tecnologias referem-se à produção de misturas betuminosas temperadas (MBT), que poderão ser desenvolvidas para todos os tipos de misturas betuminosas, sendo elas densas, semi-densas, contínuas ou descontínuas, aplicadas em diferentes tipos de espessuras, em zonas climáticas distintas e para vários níveis de tráfego.

O ciclo de vida de um pavimento rodoviário pode ser dividido em quatro fases, que são enumeradas em seguida:

- i) a produção dos materiais utilizados na sua construção;
- ii) a construção do pavimento propriamente dito;
- iii) a sua manutenção ou reabilitação;
- iv) a sua demolição ou reciclagem.

De acordo com Park *et al.* (2003), a carga ambiental de cada uma destas fases pode ser estimada com base no consumo de energia de cada uma delas. De acordo com os referidos autores, a fase que mais energia consome (e por consequência, mais emissões produz) é a produção dos materiais de construção rodoviária, sejam eles os seus constituintes, agregados betumes e fileres, ou os finais, as misturas betuminosas.

Neste contexto, um sem número de latentes benefícios para o uso das misturas betuminosas temperadas tem potenciado o seu crescente desenvolvimento, destacando-se entre eles a menor energia necessária para o seu fabrico, o que implica reduções de 30 a 40% dos valores de emissões de dióxido de carbono (CO₂) e dióxido de enxofre (SO₂), de 50% para os compostos orgânicos voláteis (COV), de 10 a 30% para o monóxido de carbono (CO), de 60 a 70% para os óxidos de azoto (NO_x) e de 20 a 25% para as poeiras.

Também os aspectos económicos, ligados à redução do combustível gasto no aquecimento dos agregados nos queimadores, que poderá chegar aos 35%, são um argumento de peso a favor das MBT. Por outro lado, e no que diz respeito à colocação em obra deste tipo de misturas, a sua menor temperatura de fabrico permite um aumento da trabalhabilidade da mistura durante a sua aplicação e compactação, dado que mesmo a temperaturas mais reduzidas é possível continuar a garantir as densidades desejadas.

Ensaio levado a cabo para realizar medições da exposição aos fumos e compostos hidrocarbonatados por parte dos trabalhadores das centrais betuminosas e das equipas de pavimentação indicam reduções de 30 a 50% relativamente às misturas betuminosas convencionais, o que garante um ambiente de trabalho muito mais confortável. Existem inclusive dados obtidos na Alemanha que indicam um aumento da produtividade aquando da colocação em obra das misturas betuminosas temperadas face às misturas convencionais a quente (D'Angelo *et al.*, 2008).

Menores emissões poderão permitir que as centrais de produção de misturas betuminosas se situem em áreas comuns sem quaisquer restrições a nível ambiental. Produzir misturas betuminosas temperadas possibilita ainda o seu transporte a longas distâncias, um alargamento da época de pavimentação, permitindo a sua aplicação a temperaturas atmosféricas mais baixas do que as usuais, reduzindo o tempo de construção e diminuindo os congestionamentos de tráfego.

Existe ainda uma vantagem adicional na utilização destas misturas, traduzida por um menor envelhecimento do ligante. De facto, o seu processo de oxidação é minimizado, tendo em conta a menor temperatura de fabrico e colocação em obra. Esta mais valia resulta, na prática, em mudanças do desempenho estrutural da mistura betuminosa, tais como a redução da sua susceptibilidade ao fendilhamento térmico e estrutural. No entanto, pelo mesmo motivo a resistência à deformação permanente também pode diminuir (Hurley and Prowell, 2006).

A produção de misturas betuminosas temperadas permitirá ainda aos construtores dos países que são signatários do protocolo de Quioto contribuírem para o seu cumprimento, uma vez que as empresas deverão desenvolver tecnologias inovadoras que permitam a produção de misturas betuminosas mais “ecológicas”, actualmente à disposição, e que possam contribuir para a protecção do meio ambiente (Brosseaud and Jacques, 2008).

Para que as misturas betuminosas temperadas possam ser aceites no mercado internacional e nacional, é hoje um requisito essencial comprovar que o seu desempenho mecânico é idêntico ao mesmo tipo de misturas betuminosas, fabricadas de uma forma convencional (sem aumento significativo dos custos). Caso se comprove que as MBTs têm um comportamento adequado (em laboratório e *in situ*), e atendendo aos benefícios ambientais decorrentes da redução da energia utilizada no seu fabrico, assim como na redução das emissões durante a produção, transporte e colocação em obra, é de esperar que estas vantagens competitivas sejam fundamentais para a generalização da sua utilização.

1.2. Objectivos

Este trabalho visa a análise comparativa do desempenho mecânico de uma mistura betuminosa AC14 Surf (mistura enquadrada na prNP EN 13108-1), produzida a temperaturas convencionais (MBQ) e a temperaturas mais baixas (MBT), entre 120 e 140 °C, utilizando dois aditivos distintos, em termos das suas propriedades volumétricas, coesão (sensibilidade à água e resistência conservada), resistência à deformação permanente, módulo de rigidez e vida à fadiga.

Conhecendo o contributo fundamental que os ligantes e a sua aditivação têm para o desempenho final da mistura, pretende-se realizar uma investigação detalhada do desempenho dos potenciais ligantes a utilizar, na sua forma original e aditivados. Assim, serão efectuados ensaios de reologia e viscosidade dinâmica aos ligantes, e serão determinadas as suas propriedades básicas (penetração e anel e bola), para observação do seu comportamento e determinação das temperaturas ideais de fabrico e compactação, bem como para a selecção do aditivo mais adequado e a percentagem óptima em que deve ser adicionado.

Procurar-se-á também avaliar a afinidade entre o betume e os agregados, e principalmente a sua eventual diminuição pela utilização dos aditivos, situação que tem sido referida por alguns autores como resultando da utilização de ceras para aditivação do betume.

Para comprovar o adequado desempenho estrutural e funcional das misturas temperadas, comparativamente às misturas convencionais a quente, considerou-se ser necessário executar um trecho experimental em que foram aplicadas as diferentes misturas estudadas em

laboratório (uma mistura betuminosa a quente e duas misturas betuminosas temperadas). Este trecho será utilizado para validar a formulação de laboratório e para verificar possíveis dificuldades na produção e no espalhamento das misturas betuminosas temperadas. O trecho será caracterizado com o deflectómetro de impacto (estruturalmente) e o equipamento multifunções (a nível funcional) para avaliar o desempenho das misturas *in situ*. Também serão recolhidas amostras para comparar as propriedades das misturas betuminosas temperadas e a quente obtidas em laboratório e no trecho (sensibilidade à água, resistência à fadiga e à deformação permanente e módulo de rigidez).

Finalmente, pretende-se realizar um breve estudo do envelhecimento durante as fases de fabrico e colocação em obra (alteração das propriedades do ligante) e realizar um estudo simplificado dos custos associados à aplicação das misturas betuminosas temperadas.

1.3. Conteúdo da Tese e Metodologia

O conteúdo deste trabalho está sumariamente descrito no índice do mesmo. Este subcapítulo visa a descrição de cada um dos capítulos de forma a facilitar a compreensão das matérias aqui retratadas.

No Capítulo 1 (Introdução) é feito o enquadramento do tema em estudo e faz-se uma abordagem genérica à importância global, nacional e internacional das misturas betuminosas temperadas. Em seguida são apresentados os objectivos do trabalho, a sua finalidade, e faz-se uma breve descrição do conteúdo da tese.

No Capítulo 2 (Estado da arte sobre misturas betuminosas temperadas) é efectuada uma descrição breve da maioria das técnicas que têm vindo a ser desenvolvidas para a produção das misturas betuminosas temperadas, bem como os seus últimos desenvolvimentos. Também são enumerados os potenciais benefícios das MBTs, que por si só justificam a utilização deste tipo de misturas, e são expostas as práticas que têm vindo a ser publicadas como sendo as mais adequadas para a produção e colocação em obra deste tipo de misturas.

O Capítulo 3 (Estudo da composição e do desempenho laboratorial das misturas betuminosas temperadas) é o primeiro dos que traduzem a componente experimental deste trabalho. Aqui é descrito todo o trabalho prévio de caracterização, produção e selecção dos ligantes a utilizar

neste estudo. A partir da análise dos resultados obtidos com a reologia, viscosidade e características básicas dos ligantes, foi seleccionado o tipo de betume e a quantidade de aditivo a utilizar para fabrico das misturas betuminosas temperadas. Realça-se também o estudo para avaliação da afinidade agregado-betume, uma vez que alguns autores indicam que a redução desta afinidade é um eventual problema nas misturas betuminosas temperadas. Em seguida realizou-se o estudo de formulação das misturas betuminosas, onde se descreve toda a componente experimental da validação em laboratório da composição das misturas betuminosas (granulometria e percentagem de betume), que serviu de base ao estudo de todas as misturas betuminosas (com ou sem aditivos para redução da temperatura de fabrico). Depois são apresentados os critérios de optimização da selecção da percentagem de aditivo e da temperatura de produção das misturas betuminosas temperadas, tendo como base o ensaio de compactabilidade. Finalmente, faz-se um estudo comparativo entre as MBQ e MBT relativamente às suas propriedades volumétricas e ao seu desempenho mecânico avaliado através de ensaios sensibilidade à água, resistência à fadiga e à deformação permanente e módulo de rigidez.

O Capítulo 4 (Validação na produção das misturas betuminosas temperadas em trecho experimental) pormenoriza todo o trabalho de campo efectuado no âmbito deste estudo. Com as misturas formuladas de acordo com o descrito no Capítulo 3, foi executado um trecho experimental de aproximadamente 1,6 Km. Assim, serão descritas todas as operações necessárias de preparação para a produção das misturas betuminosas, desde a modificação do ligante até ao controlo da temperatura na produção, bem como a sua aplicação em obra, e ensaios posteriormente efectuados sobre a mistura produzida e aplicada. O desempenho obtido com as misturas aplicadas no trecho permitirá validar os resultados obtidos em laboratório ou detectar eventuais problemas que podem ocorrer durante as fases de produção em central ou aplicação em obra. Em seguida apresentam-se os resultados de caracterização do trecho com o deflectómetro de impacto (estruturalmente) e o equipamento multifunções (a nível funcional). É ainda feito um balanço económico sumário que pretende descrever comparativamente os custos das misturas betuminosas a quente e temperadas.

No último capítulo (Capítulo 5) são explanadas as principais conclusões deste estudo, bem como perspectivas futuras e aspectos que poderão ser investigados, decorrentes das principais conclusões do presente trabalho.

2. ESTADO DA ARTE SOBRE MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS

2.1. Introdução

Os esforços para desenvolver misturas betuminosas que exijam níveis reduzidos de recursos naturais e consumam menos energia no processo de produção estão a dar bons resultados, no momento em que as indústrias estão pressionadas a reduzir o consumo de combustíveis fósseis e os níveis de CO₂ produzidos.

A redução das temperaturas elevadas utilizadas durante a produção das misturas betuminosas é um dos domínios, no âmbito da construção rodoviária, em que se conseguem as maiores poupanças energéticas. Hoje em dia existem no mercado diversas soluções técnicas muito completas que permitem atingir este objectivo, e que se encontram disponíveis no mercado ao alcance de todos (Nynas, 2009). No entanto, para chegar até aqui foi necessário percorrer um longo caminho.

Pelo mundo fora, um dos fios condutores na redução dos níveis de CO₂ e gases com efeito de estufa, para combater o aquecimento global, é o protocolo de Quioto, adoptado e assinado por consenso na terceira sessão da Convenção Básica das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), realizada em Dezembro de 1997 em Quioto. Na sua generalidade, este protocolo visa a redução da produção de CO₂ em pelo menos 5,2% em relação aos níveis de 1990 no período entre 2008 e 2012.

Apesar dos Estados Unidos se negarem a ratificar o Protocolo de Quioto, alegando não só que os compromissos acarretados por tal protocolo interfeririam negativamente na economia norte-americana, mas também devido, entre outros, à inexistência de metas obrigatórias de redução das emissões de gás carbónico para os países em desenvolvimento, existiram neste país outro tipo de legislações e obrigações que visam o mesmo fim do referido protocolo.

Em Março de 2005, a agência Norte Americana para a protecção do meio ambiente, a US EPA, publica a *Clean Air Rules* (CAIR), um conjunto de regulamentos que visam a melhoria drástica da qualidade do ar em 28 dos 50 estados dos Estados Unidos da América. Várias medidas foram implementadas visando o cumprimento das metas estabelecidas, nomeadamente com imposições para a redução das emissões das indústrias da construção,

onde estão integradas as centrais de misturas betuminosas a quente. Neste sentido, houve Estados onde o número de horas e o período do dia de produção para as centrais foram reduzidas e fixadas (FHWA, 2008).

O conceito de desenvolvimento sustentável traduz-se num modelo de desenvolvimento global que incorpora os aspectos ambientais num modelo de desenvolvimento socioeconómico. A aplicação desta temática abarca, por exemplo, a redução das emissões e a possibilidade de incorporação de misturas betuminosas a recuperar (*Reclaimed Asphalt*, RA, na terminologia anglo-saxónica), de forma economicamente vantajosa e sem comprometer o futuro das gerações.

No entanto, este conceito não foca exclusivamente o ambiente, englobando três áreas independentes: desenvolvimento económico, social e protecção ambiental (Figura 2.1).



Figura 2.1 – Desenvolvimento sustentável

Várias associações e agências governamentais na Europa adoptaram o conceito de desenvolvimento sustentável, sendo as misturas betuminosas temperadas e a tecnologia da sua produção consistentes com este conceito (D'Angelo *et al.*, 2008).

2.2. Benefícios da Utilização de Misturas Betuminosas Temperadas

A redução das temperaturas de produção e aplicação das misturas betuminosas proporciona benefícios de sustentabilidade evidentes a curto, médio e longo prazo, possíveis de agrupar em vantagens sociais, económicas e ambientais (Nynas, 2009).

2.2.1. Benefícios Sociais

Redução das emissões

Ao reduzir emissões são melhoradas as condições de trabalho dos operários, e as condições ambientais a nível global para a sociedade. Informações obtidas na Europa mostram que as misturas betuminosas temperadas reduzem significativamente a exposição dos trabalhadores da pavimentação de estradas aos fumos, reduções que chegam a 30-50% em relação às misturas betuminosas a quente (D'Angelo *et al.*, 2008).

Dados de França, Alemanha e Itália, onde são feitas comparações directas das medições dos fumos e dos aerossóis (difíceis de efectuar entre países distintos), demonstram que mesmo para as exposições associadas à pavimentação com misturas betuminosas a quente os valores obtidos são inferiores ao estabelecido pela regulamentação em vigor. Relativamente às misturas betuminosas temperadas os ensaios levados a cabo indicam reduções de cerca de 30 a 50% para os aerossóis, fumos e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (Ruhl and Liendemeier, 2006).

Adicionalmente, reduzir os trabalhadores à exposição dos fumos (pelas mais baixas temperaturas praticadas) pode também proporcionar condições de trabalho mais cómodas, existindo inclusive na Alemanha dados de um empreiteiro que observou aumentos de produtividade na colocação das misturas betuminosas temperadas (Prowell and Hurley, 2008).

Menores restrições na construção

Embora este não tenha sido um benefício preponderante para o desenvolvimento das misturas betuminosas temperadas, pode ser particularmente atractivo. De facto, a possibilidade de realizar pavimentações a temperaturas baixas (abaixo dos 10 °C), com obtenção de compactações adequadas, é claramente uma vantagem desta tecnologia.

Além disso, a capacidade de transporte e aplicação a distâncias muito superiores às habitualmente praticadas, e mesmo assim com a trabalhabilidade adequada, associada a compactações com menor esforço, e à possibilidade de uma abertura ao tráfego mais rápida, proporcionam um agradável cenário de benefícios sociais (FHWA, 2008).

2.2.2. Benefícios Económicos

Redução do consumo de fuel

A redução da temperatura de produção em central tem por consequência uma redução significativa do consumo de combustíveis (APAO, 2003).

Cálculos teóricos indicam que reduções de cerca de 28 °C podem resultar em poupanças de fuel de cerca de 11%. Dados de diversos relatórios de vários projectos com misturas betuminosas temperadas indicam poupanças de fuel típicas de 20 a 35% na produção destas misturas. Estes valores poderão ser superiores se a combustão for optimizada. Note-se que os níveis de poupança de fuel dependem de vários factores, tais como as reduções de temperatura efectivamente praticadas para produzir as misturas betuminosas temperadas, o teor em água dos agregados, e as condições de funcionamento da central. Medições efectuadas permitem concluir que aumentos de 1% no teor em água dos agregados aumentam o consumo de fuel em 10% (Prowell and Hurley, 2008).

Maiores taxas de incorporação de misturas betuminosas a reciclar

A utilização da tecnologia associada à produção de misturas betuminosas temperadas será benéfica nas misturas com altas percentagens de incorporação de RA por diversos motivos. Em primeiro lugar, a redução da viscosidade do ligante actuará como promotor da compactação. Outra vantagem é a diminuição do envelhecimento do ligante resultante das temperaturas mais baixas de produção, auxiliando o rejuvenescimento do ligante do RA, e aumentando a vida à fadiga da mistura, minimizando os problemas de fissuração (Ruhl and Lidemeyer, 2006). Adicionalmente, pode ser também considerado que ao incorporar maiores taxas de RA se diminui a quantidade de agregados virgens utilizados, bem como a necessidade de deposição do RA em vazadouros autorizados, no caso da sua não utilização, o que se traduz também em economias significativas (Nynas, 2009).

2.2.3. Benefícios Ambientais

Redução das emissões

Ao reduzir a temperatura reduz-se de forma importante as emissões associadas. Dados fornecidos pela Noruega, Itália, Holanda e França assim o indicam, de acordo com os dados apresentados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Dados relativos à redução de emissões com as misturas betuminosas temperadas, em percentagem (adaptado de FHWA, 2008)

Emissões	Noruega	Itália	Holanda	França
CO ₂	31,5	30-40	15-30	23
SO ₂	ND	35	ND	18
COVs	ND	50	ND	19
CO	28,5	10-30	ND	ND
NO _x	61,5	60-70	ND	18*
Pó	54	25-55	ND	ND

* Como NO₂

ND – Não determinado

Dados do “Fórum Bitumen” relacionam as emissões com a temperatura. Temperaturas abaixo dos 80 °C, no limite, não causam emissões. Mesmo a 150 °C as emissões são de apenas 1 mg/h. No entanto, a 180 °C são registadas emissões relevantes (Ruhl and Lidemeyer, 2006).

Nos EUA foram descritos problemas com aumentos de emissões, particularmente CO e COV, devido essencialmente a uma má combustão do queimador. Estes problemas não foram indicados na Europa, talvez devido à existência de centrais mais pequenas, associadas a queimadores de menores dimensões e mais fáceis de controlar (FHWA, 2008).

Maior conservação de recursos naturais

Ao permitir a incorporação e utilização de elevadas quantidades de RA, conforme descrito anteriormente (o que implica um maior aproveitamento dos agregados e ligantes “secundários”), é conseguida uma maior preservação dos recursos naturais existentes. Numa publicação recente do programa WRAP (*Waste and Research Accion Program*), do Reino Unido, foi assinalado que a inclusão de apenas 14% de RA nas misturas betuminosas reduz as emissões de carbono em 4%, sendo conseguida uma redução global do impacto no meio ambiente de 9% (Nynas, 2009).

2.3. Breve História das Misturas Betuminosas Temperadas

A produção de misturas betuminosas a temperaturas mais baixas não é um conceito recente. De acordo com Chowdhury and Button (2008), já em 1956 o Professor Ladis Csanyi, da Universidade do Iowa, avaliou o potencial da espuma de betume como um ligante para solos (Figura 2.2). Desde então, as tecnologias de betume-espuma, que permitem a redução das

temperaturas de fabrico das misturas betuminosas, têm sido amplamente utilizadas com sucesso em vários países.

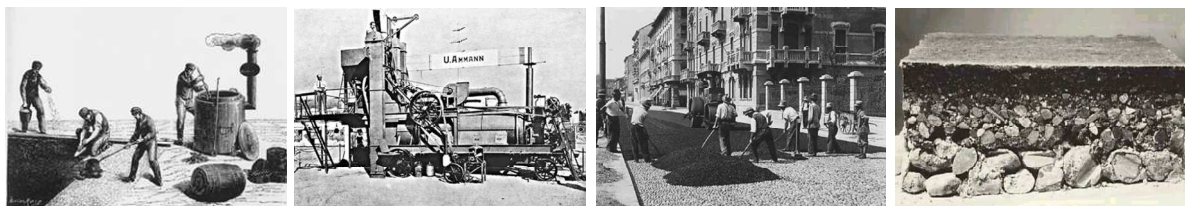


Figura 2.2 – Um pequeno apontamento da história das misturas betuminosas temperadas

O processo original consistia em introduzir vapor de água no betume quente. Em 1968, a Mobil Oil na Austrália, que patenteou a descoberta de Csanyi, modificou o método original substituindo a injeção com vapor de água por água fria, agilizando o processo de produção do betume-espuma (Kristjansdottir *et al.*, 2007).

No início dos anos 70, a Chevron desenvolveu critérios de dimensionamento e formulação para pavimentos em misturas betuminosas estabilizadas com emulsões, publicando em 1977 o “Bitumuls Mix Manual”, um manual com informações valiosas sobre a metodologia de dimensionamento, formulação e produção deste tipo de misturas.

Seguiram-se manuais similares, publicados pela FHWA e AEMA em 1979 e 1981, respectivamente, seguindo-se um crescente e unânime consenso na utilização deste tipo de misturas, principalmente para utilização em meios onde existem restrições nas emissões, bem como para zonas com baixos níveis de tráfego.

Em 1994, Maccarone *et al.* (1994) estudaram as misturas betuminosas a frio com betume espuma como ligante, e as misturas betuminosas com elevados conteúdos de emulsão, concluindo que estas representavam um ganho na construção de estradas devido à eficiência energética e às baixas emissões.

As primeiras estradas construídas com misturas betuminosas temperadas são Europeias, e datam de 1995, sendo construídas na Alemanha com adição de Aspha-Min[®], um zeólito sintético, seguindo-se a aplicação desta tecnologia na Noruega e na Dinamarca (Prowell and Hurley, 2008).

Também em 1995, a Shell Bitumen patenteia a técnica WMA-Foam[®], resultado de uma investigação inovadora, baseada no conceito da técnica de mistura de dois componentes dos betumes moles e duros (FHWA, 2008).

Em 1997, o Sasobit[®], um aditivo orgânico, descrito com detalhe mais à frente, começa a ser amplamente comercializado na Europa como auxiliar na compactação das misturas betuminosas, pela Sasol Wax Internacional AG (Sasol, 2004). Esta tecnologia tem crescido consideravelmente desde então na produção de misturas betuminosas temperadas.

Jenkins (2000) introduz um novo processo na produção de misturas betuminosas semi-temperadas com betume espuma. O conceito consistiu em avaliar os benefícios de aquecer os agregados a temperaturas ligeiramente acima da temperatura ambiente, mas abaixo dos 100 °C, antes da introdução da espuma de betume. Este novo processo, segundo este autor, potencia o envolvimento das partículas, a coesão, a resistência à tracção e a compactação, sendo particularmente vantajosos no caso de misturas com elevados conteúdos de RA, ou misturas britadas densamente graduadas.

De acordo com o descrito por diversos autores, provavelmente devido ao custo e escassez dos combustíveis fosseis, a Europa, a África do Sul e a Austrália começam a estudar os benefícios e o desempenho das misturas betuminosas temperadas (Koenders *et al.*, 2002).

Em 2002, a NAPA (Agencia Nacional Americana dos Pavimentos) lidera uma visita pela Europa visando a análise e estudo das misturas betuminosas temperadas. Desde essa altura, também nos EUA o interesse e desenvolvimento desta tecnologia cresceram de forma exponencial, de tal forma que a FHWA designou as misturas betuminosas temperadas como área em foco e organiza com a NAPA, em 2003, uma conferência cujo objectivo principal é explorar a seu potencial de utilização nos EUA.

Em 2004, no “*World of Asphalt*” são apresentados projectos e desenvolvimentos nesta área por diversas empresas e entidades rodoviárias. Desde então, quer nos EUA, quer na Europa, não mais se parou de estudar as vantagens da tecnologia de produção de misturas betuminosas temperadas. Na Figura 2.3 resumem-se as principais etapas do desenvolvimento desta tecnologia, que foram descritos anteriormente.

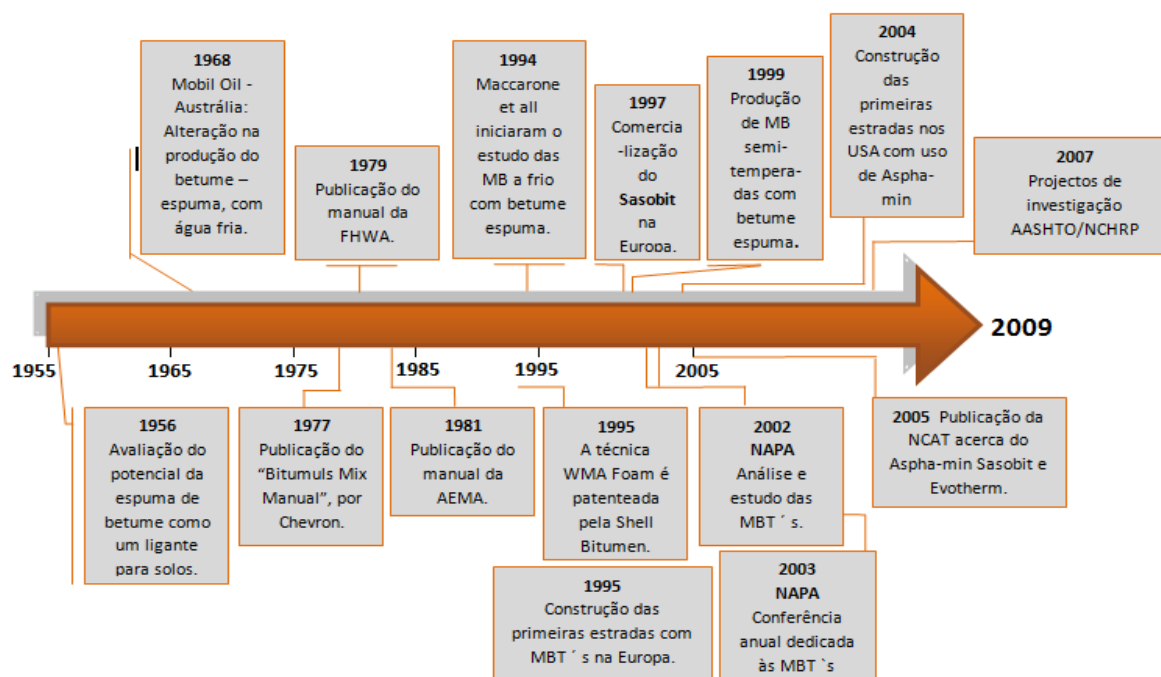


Figura 2.3 – Resumo da história das misturas betuminosas temperadas

2.4. Tecnologias para Produção de Misturas Betuminosas Temperadas

Existem várias formas de classificação das misturas betuminosas, sendo uma delas a sua divisão pela gama de temperatura de produção. A Figura 2.4 mostra a classificação utilizada para as misturas betuminosas em função da redução da temperatura de produção em central.

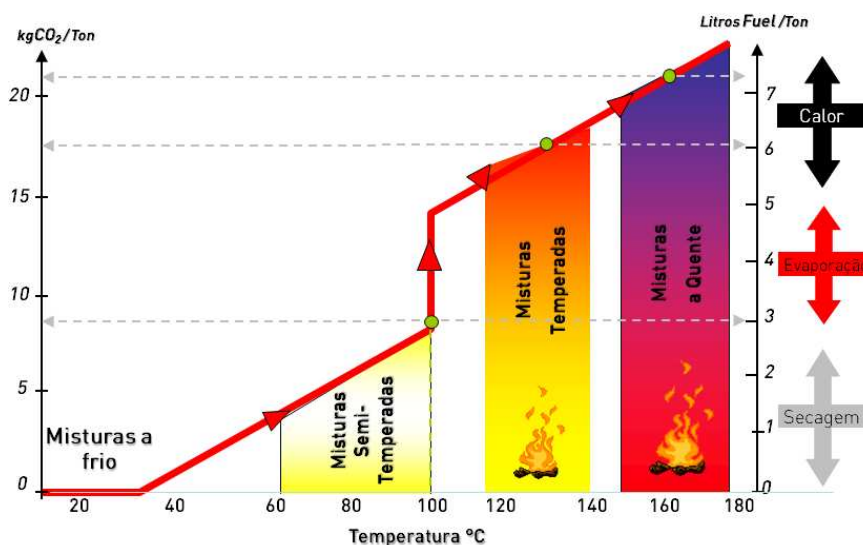


Figura 2.4 – Classificação das tecnologias de produção de misturas betuminosas em função da temperatura de produção (adaptado de FHWA, 2008)

A EAPA (2009) classifica como misturas a frio as misturas produzidas sem aquecimento dos agregados e com emulsões de betume ou betume espuma.

As misturas betuminosas semi-temperadas são produzidas a temperaturas abaixo da linha de evaporação da água (100°C), com os agregados aquecidos a uma temperatura de mistura entre 70 e 100 °C, aproximadamente.

As misturas betuminosas temperadas têm, segundo esta classificação, uma gama típica de temperaturas de produção entre os 120 e os 140 °C. Finalmente, as misturas betuminosas a quente são usualmente produzidas entre 150 e 180 °C, dependendo do tipo de ligante utilizado para produzir a mistura.

No que diz respeito às técnicas de produção das misturas betuminosas temperadas, e de acordo com a subdivisão que é feita por vários autores (Vaitkus *et al.*, 2009a; EAPA, 2007; Vaitkus *et al.*, 2009), distinguem-se quatro grandes grupos de tecnologias, que podem ser observadas na Figura 2.5.

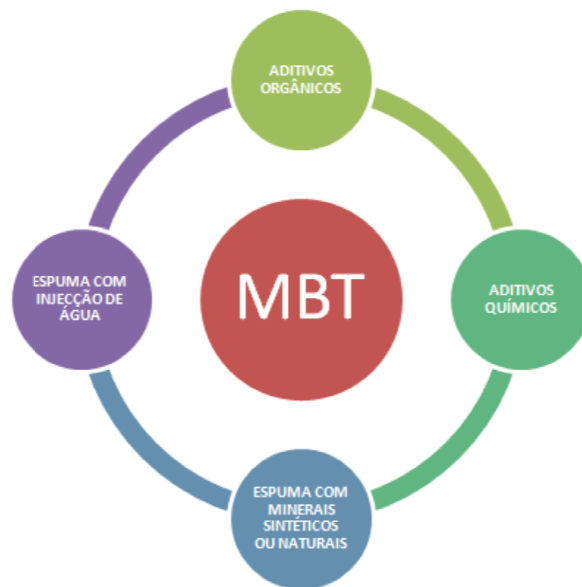


Figura 2.5 – Técnicas de produção das misturas betuminosas temperadas

Tendo em consideração esta classificação, nos próximos subcapítulos serão elencadas as principais tecnologias de fabrico de misturas betuminosas temperadas, descrevendo-se, dentro de cada grupo, aquelas que mais tem sido utilizadas em todo o mundo. Em seguida, no

Quadro 2.2 resumem-se as principais informações relativas às tecnologias de produção das misturas betuminosas temperadas.

Quadro 2.2 – Resumo das principais tecnologias de produção de misturas betuminosas temperadas

Tecnologia	Empresa proprietária da patente	Gama de temperatura de fabrico (°C)
ADITIVOS ORGÂNICOS		
Sasobit® (Ficher-Tropsch wax)	Sasol Wax GmbH, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre os 130 e os 170 °C
Asphaltan B® (Cera de Montana, estéril de baixo peso molecular)	Romonta GmbH, Alemanha	
Licomont BS 100®	Clariant, Suíça	
ADITIVOS QUÍMICOS		
Rediset®	Akzo Nobel, Holanda	Reduções de cerca de 15°C da temperatura referência das MBQ
Cecabase RT®	CECA, França	120-140 °C
Interlow T®	Interchimica, Itália	120-140 °C
Evotherm®	MeadWestvaco, EUA	85-115 °C
Revix® ou Evotherm 3G®	MeadWestvaco Mathy-Ergon , EUA	130-140 °C
ESPUMA DE BETUME COM MINERAIS SINTÉTICOS OU NATURAIS		
Aspha-Min® (Zeólito sintético)	MHI Group e Eurovia Services GmbH, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre os 130 e os 170 °C
Advera® (Zeólito sintético)	PQ Corporation, EUA	
Zeólito Natural	Vários	
ESPUMA DE BETUME POR INJEÇÃO DE ÁGUA		
WAM Foam®	Shell, UK, e Kolo-Veidekke, Noruega	110-120 °C
Terex WMA System	Terex, EUA	130 °C
Double-Barrel® Green	Astec Industries, EUA	121-135 °C
LEA - Low Energy Asphalt (EBT® e EBT®)	LEA-CO (Joint-Adventure Eiffage/Fairco para divulgar a LEA). Nos EUA os direitos de utilização são da McConnaughay	<100 °C
LT Asphalt® (LEA)	Nynas, Suécia	
LEAB®	Royal BAM Group, Holanda	110-115 °C
Ultrafoam GX®	Gencor Industries, EUA	

Como se pode analisar pelo Quadro anterior, as tecnologias de fabrico de misturas betuminosas temperadas também podem ser agrupadas de acordo com a temperatura de produção de acordo com o esquema apresentado na Figura 2.6.

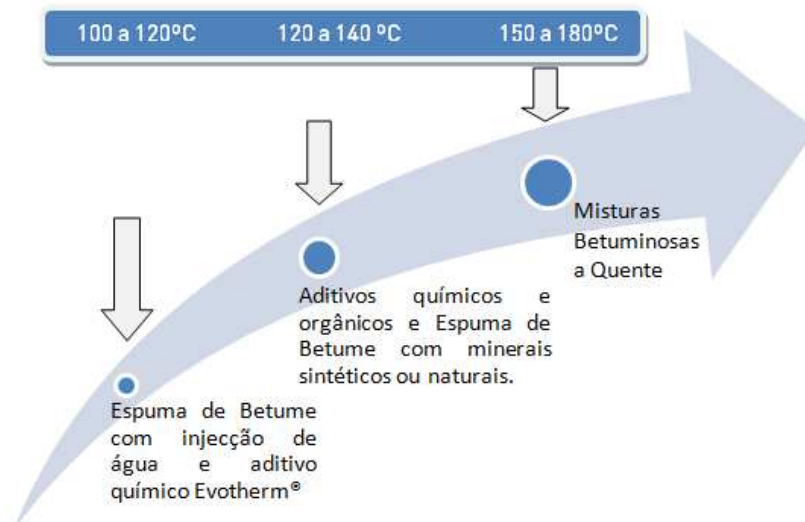


Figura 2.6 – Tecnologia de fabrico das misturas betuminosas temperadas em função da temperatura de produção

2.4.1. Aditivos Orgânicos

De acordo com a D'Angelo *et al.* (2008), diferentes tipos de aditivos orgânicos podem ser utilizados para diminuir a viscosidade do ligante a temperaturas acima do ponto de amolecimento das ceras, que é cerca de 90 °C.

O tipo de aditivo deve ser seleccionado criteriosamente para que o seu ponto de amolecimento seja superior ao esperado nas temperaturas de serviço (de outra forma poderemos ter a ocorrência de deformações permanentes) e para minimizar a fragilidade da mistura a baixas temperaturas. Os aditivos orgânicos, usualmente ceras e aminas gordas, podem ser adicionados quer à mistura, quer ao ligante.

Sasobit®

Este aditivo, da classe dos aditivos orgânicos, é de acordo com FHWA (2008) o mais utilizado no mundo. Chowdhury and Button (2008) descreveram o Sasobit®, um produto da *Sasol Wax* (antigamente *Schumann Sasol*) da África do Sul, como sendo um Fischer-Tropsch (F-T) ou cera sintética produzida pelo aquecimento de carvão ou gás natural com vapor de água, na presença de um catalisador (Sasol, 2008). Este aditivo pode ser fornecido comercialmente de diversas formas, tal como se apresenta na Figura 2.7.



Figura 2.7 – Duas formas de apresentação do aditivo Sasobit[®] (Hurley and Prowell, 2008)

A principal característica do Sasobit[®] é o seu ponto de amolecimento, com uma gama de variação entre os 70 e os 114 °C. A penetração desta cera a 25 °C é inferior a 1 dmm. A cera (derretida) tem uma viscosidade de 12 mPa s a 135 °C.

A combinação do Sasobit com o betume após arrefecimento da mistura resulta na solidificação da cera em partículas alongadas, microscópicas, e distribuídas regularmente. Acredita-se que esta distribuição potencia a diminuição da viscosidade do ligante modificado com Sasobit à temperatura de pavimentação. Desta forma, a temperatura de fabrico e compactação da mistura poderá ser reduzidas em 10-30 °C (Sasol, 2004).

De acordo com Hurley and Prowell (2005c), o Sasobit[®] é reconhecido por melhorar a compactabilidade da mistura, tanto na compactação giratória como por impacto.

A mistura destes aditivos em central pode ser conseguida pela adição à mistura betuminosa no misturador, sem qualquer alteração no procedimento de produção, ou previamente misturado com o ligante, no tanque da central ou na refinaria, sem a preocupação de um sistema de agitação adicional. As taxas de incorporação típicas variam entre 0,8 a 4% sobre o peso do ligante, não devendo exceder estes valores devido aos efeitos sobre a rigidez do ligante a baixas temperaturas.

Asphaltan B[®]

O Asphaltan B[®] é um produto da *Romonta GmbH*, Amsdorf, Alemanha. Caracteriza-se por ser uma mistura de substâncias originada nos constituintes da cera de Montana, com um elevado peso molecular de hidrocarbonetos, tendo sido especificamente criada para a mistura *hot rolled asphalt* (Corrigan, 2008).

De acordo com Chowdhury and Button (2008), o crude de onde se extrai a cera de Montana é encontrado na Alemanha, no leste da Europa e em algumas áreas dos EUA, em certos tipos de depósitos de carvão de lenhite formados ao longo de eras geológicas pela transformação de vegetação fossilizada. Aparentemente, a cera que outrora protegeu as raízes das plantas das adversidades climatológicas não se decompôs devido à sua elevada estabilidade e insolubilidade em água, enriquecendo o carvão e sobrevivendo ao longo dos anos.

Depois de extraída nas minas, a cera de Montana é então retirada do carvão por meio de uma destilação com tolueno. A *Romonta GmbH* tem a posse de 80% do mercado global da extracção deste produto.

Ainda de acordo com os mesmos autores, *Remonta GmbH* recomenda a adição de cerca de 2 a 4% de Asphaltan B[®] ao betume, em peso. A sua adição é possível no misturador da central ou no ligante, podendo também ser adicionado a betumes modificados com polímeros.

O ponto de amolecimento do Asphaltan B[®] é aproximadamente 100 °C (semelhante ao F-T), melhorando as características do ligante a temperaturas mais baixas, e aumentando a compactabilidade e a resistência às deformações permanentes.

2.4.2. Aditivos Químicos

O processo de produção de misturas betuminosas temperadas com recurso a aditivos químicos, surfactantes (nome que resulta da terminologia inglesa *surface active agent*) ou tensioactivos, não assenta na redução da viscosidade do ligante, mas sim numa diferente variedade de mecanismos que visam a melhoria do recobrimento do agregado pelo ligante, mesmo a baixas temperatura (Hurley and Prowell, 2006).

Evotherm[®]

O Evotherm[®] é produzido e foi desenvolvido nos EUA pela *MeadWestvaco Asphalt Innovations*, Charleston, Carolina do Sul. O Evotherm[®] usa uma tecnologia não patenteada, baseada na utilização de um composto químico que inclui agentes emulsionantes, aditivos promotores do recobrimento dos agregados, da trabalhabilidade, da compactação, bem como do aumento da afinidade betume-agregado. A MeadWestvaco prevê o desenvolvimento de uma emulsão à medida e para as necessidades de cada tipo de agregado.

De acordo com Hurley and Prowell (2005b), o Evotherm é uma emulsão betuminosa com uma percentagem de betume residual da ordem dos 70%, o que aumenta a afinidade do betume ao agregado.

Chowdhury and Button (2008) referem a facilidade de não serem necessárias alterações nas centrais de misturas betuminosas para a utilização deste aditivo. Ainda de acordo com os mesmos autores, ao contrário do que acontece com os ligantes tradicionais, o Evotherm[®] pode ser armazenado em central num tanque próprio para emulsões a cerca de 70 °C, sendo que a temperatura do óleo de aquecimento deve ser cerca de 93 °C antes da bombagem do Evotherm[®] para prevenir que haja quebras nas linhas.

Durante a produção, a emulsão é simplesmente usada em vez do betume, misturada com os agregados, havendo a libertação da água da emulsão sob a forma de vapor. A mistura produzida assemelha-se a uma mistura betuminosa a quente, e conseguem-se reduções da temperatura de fabrico até cerca de 65 °C (Hurley and Prowell, 2006).

Rediset[®] WMX

O Rediset[®] WMX é um aditivo químico da *Azko Nobel*, constituído por uma combinação de surfactantes químicos e orgânicos, que modificam a reologia do ligante. Não contém água, sendo os surfactantes que incrementam o envolvimento da superfície dos agregados com o ligante através de uma “adesão activa”, e os restantes componentes do aditivo reduzem a viscosidade do ligante (Prowell and Hurley, 2008).

Foram descritas reduções de cerca de 15 °C na temperatura de fabrico, e as taxas típicas de incorporação deste aditivo, que é habitualmente fornecido em pastilhas (Figura 2.8), são da ordem dos 1,5 a 2,0% do peso do ligante.

A utilização do Rediset[®] não requer qualquer modificação no processo de formulação da mistura, com excepção da temperatura de fabrico e compactação. Este aditivo melhora as propriedades da afinidade do betume ao agregado, sendo que desta forma se poderá evitar a utilização de outro aditivo para melhorar esta propriedade, caso este fosse necessário (Chowdhury and Button, 2008).



Figura 2.8 – Pastilhas de Rediset®

A sua introdução na central de produção de misturas betuminosas pode ser feita directamente no tanque do ligante, ou na mistura imediatamente após a introdução do ligante. No entanto, ao ser introduzido na mistura, é necessário alterar o sistema de introdução do ligante, dando-lhe a possibilidade de ao mesmo tempo poder introduzir o aditivo.

Revix®

O Revix® é um aditivo químico desenvolvido nos EUA pela *Mathy Technology and Engineering Services, Inc.* e pela *Paragon Technical Services*. Este aditivo actua devido à presença de uma variedade de componentes na sua composição, como agentes tensioactivos ou surfactantes, ceras, auxiliares do processo químico, polímeros e outros materiais, não dependendo da produção de espuma, ou da redução da viscosidade, para reduzir a temperatura de produção e compactação das misturas (Prowell and Hurley, 2008).

De acordo com vários autores, esta tecnologia para redução da temperatura de produção não requer quaisquer modificações na formulação das misturas betuminosas (excepto para as suas temperaturas de fabrico e compactação), nem nas centrais de produção da mistura betuminosa, devendo o aditivo ser misturado directamente no ligante (Hurley and Prowell, 2008; Chowdhury and Button, 2008).

Cecabase RT®

Na categoria dos aditivos químicos enquadra-se também o Cecabase. De acordo com a informação disponível em CECA (2008), este aditivo é constituído por uma base de agentes

tensioactivos ou agentes de superfície que, quando misturados com o betume, permitem reduzir até 45 °C, aproximadamente, a temperatura de compactação da mistura.

Ainda segundo a mesma fonte, este aditivo, líquido e de simples utilização, é estável ao armazenamento por cerca de dez dias, e não obriga a quaisquer modificações na central de produção da mistura. De facto, pode ser misturado nas quantidades definidas no ligante, em tanque ou na linha, seja qual for a sua gama de penetração, não modificando as suas propriedades fundamentais e promovendo o recobrimento dos agregados pelo ligante, incluindo as partículas finas.

2.4.3. Espuma de Betume com Minerais Sintéticos ou Naturais

A tecnologia de produção de MBT com recurso a minerais sintéticos ou naturais tem como base a utilização de zeólitos.

De acordo com Virta (2008), existem mais de 40 tipos de zeólitos naturais identificados nos últimos 200 anos, distinguidos pelas diferenças na sua composição química e pelo tamanho e arranjo da sua estrutura cristalina. A Clinoptilolite é o zeólito natural mais comum, seguida da Chabazite e Mordenite.

As principais diferenças entre os zeólitos naturais e sintéticos, para além do processo químico que envolve a produção de zeólitos sintéticos, é o rácio sílica/alumínio, que nas naturais é de 5:1, sendo nas sintéticas de 1:1.

Os zeólitos constituem um grupo numeroso de minerais, aluminosilicatos hidratados e alcalimetals, que possuem uma estrutura porosa e aberta que pode acomodar uma grande variedade de iões positivos, como sódio e cálcio. Permitem também a presença de grupos de catiões, como moléculas de água, e a grande maioria é caracterizada pela sua capacidade de perder e absorver água sem danificar a sua estrutura mineral.

Os minerais em questão contêm cerca de 20% de água da sua cristalização, que é libertada quando são submetidos a aquecimento acima do ponto de ebulição da água. Na produção das misturas betuminosas temperadas, e quando em contacto com o ligante, criam um efeito

controlado de espuma, o que origina um ligeiro incremento do volume do ligante, reduzindo a sua viscosidade (Prowell and Hurley, 2008).

Ainda de acordo com dados existentes, a utilização da tecnologia de produção de misturas betuminosas temperadas com zeólitos permite uma melhoria do tempo de trabalhabilidade das misturas de cerca de 6 a 7 horas ou até a temperatura das misturas descer até cerca de 100 °C (Prowell and Hurley, 2008).

Zeólitos Sintéticos (Aspha-min[®] e Advera[®])

O processo de produção de misturas betuminosas temperadas com as duas tecnologias acima descritas é semelhante. Como descrito por Hurley and Prowell (2005a), o calor liberta a água contida no zeólito, que actua como um sistema de introdução de um novo fluido.

Tipicamente, e no que diz respeito à formulação das misturas betuminosas com estes dois tipos de produtos, não é necessário alterar a metodologia utilizada, adicionando a quantidade recomendada pelo fornecedor, ao mesmo tempo que o ligante, na altura da validação em laboratório. Estes zeólitos podem ser encontrados em pó, ou em pequenos cristais, tal como se pode observar na Figura 2.9 (Hurley and Prowell, 2008).

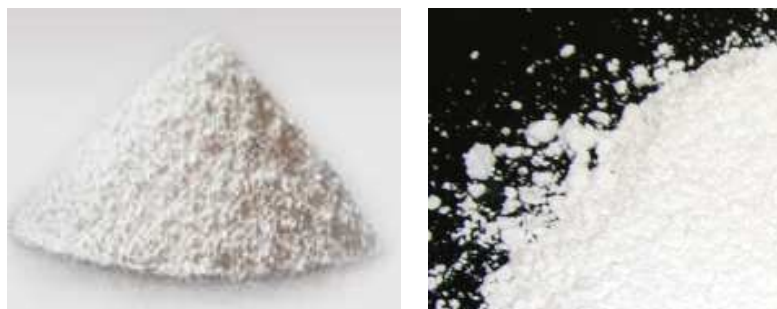


Figura 2.9 – Zeólitos sintéticos Aspha-min[®] (esquerda) e Advera[®] (direita)

Ainda de acordo com a mesma fonte, os zeólitos sintéticos têm a sua granulometria entre o peneiro nº 50 e nº 200, e podem ser adicionadas na central por diferentes métodos:

- Numa central descontínua podem ser introduzidos nos sacos directamente no misturador, ou automaticamente usando uma célula de pesagem;
- Nas centrais contínuas podem ser introduzidos através do anel de reciclagem, mas só para o caso do Aspha-min[®], onde pode ser utilizado também um sistema de válvulas pneumáticas semelhante ao apresentado na Figura 2.10.



Figura 2.10 – Sistema automático de introdução do Aspha-Min®

No caso do Advera® deve ser utilizado um sistema de introdução similar ao utilizado para introdução de fibras, colocado perto do local de introdução do ligante, sendo que a adição dos zeólitos deve ser feito com um sistema semelhante ao da Figura 2.11, de forma a melhorar a dispersão deste produto.

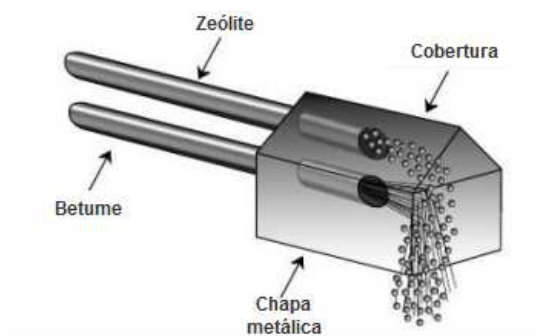


Figura 2.11 – Misturadora para adição de zeólitos (adaptado de EAPA, 2007)

Assim, o zeólito deve ser adicionado a uma temperatura de cerca de 130 °C, temperatura aproximada a que deve ser produzida a mistura, formando-se, conforme referido anteriormente, a espuma de betume pelo aumento de volume provocado no ligante pela água agregada em forma de vapor.

2.4.4. Espuma de Betume por Injecção de Água

Na presença de betume quente, uma pequena quantidade de água (cerca de 2% sobre a massa do betume) transforma-se em vapor. A rápida expansão da água, de líquido em vapor, cria bolhas de filme de betume preenchidas com vapor de água, denominadas espuma de betume. No estado espumoso, a viscosidade do betume é reduzida, permitindo o recobrimento dos agregados a temperaturas de mistura mais reduzidas (Croteau and Tessier, 2008).

No caso da tecnologia de obtenção da espuma de betume por injeção de água, esta, conforme o título indica, é conseguida por meio da injeção de água sobre a forma de spray no betume quente, ou adicionando uma fracção de agregados finos húmidos.

WMA-Foam[®]

O processo WMA-Foam[®] (*Warm Mix Asphalt Foam*) de produção de misturas betuminosas temperadas resultou de uma parceria entre a *Shell International Petroleum Company Ltd.*, Reino Unido, e a empresa norueguesa *Kolo-Veidekke* (Shell Bitumes, 2006).

O processo WMA-Foam[®] usa um sistema de adição de dois tipos de ligante em dois estágios distintos da fase de mistura, durante a produção, um dos ligantes mole e outro duro previamente espumado (Figura 2.12). Trata-se de um processo e não de uma adição de um novo tipo de material (FHWA, 2008).

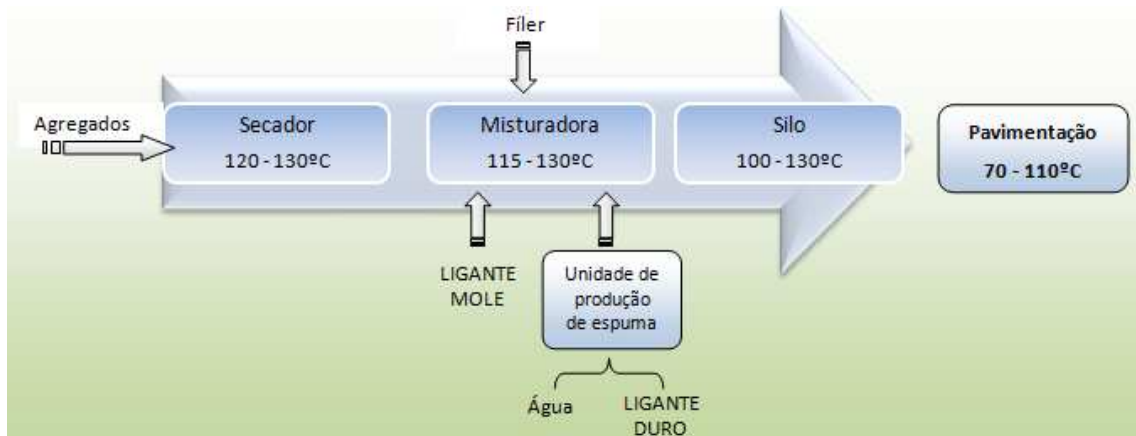


Figura 2.12 – O processo de produção de WMA-Foam[®]

A selecção destes dois ligantes é feita para que a mistura resultante tenha a gama de penetração pretendida para o ligante. O betume mole é misturado (sendo 20 a 30% do betume total) com os agregados num primeiro estágio, a temperaturas entre os 100 e os 120 °C, envolvendo completamente os agregados. No segundo estágio de produção, o ligante duro espumado é injectado na mistura anterior. Esta combinação actua diminuindo a viscosidade da mistura, dotando-a da necessária trabalhabilidade e permitindo a sua colocação e compactação a temperaturas entre os 120 e os 130 °C, conforme se pode observar resumidamente na Figura 2.12 (Chowdhury and Button, 2008).

Em centrais descontínuas, conforme referido por Kristjansdottir (2006), 1 a 5% de água é injectada numa câmara de expansão, juntamente com o betume duro (de acordo como diagrama da Figura 2.13), induzindo a formação de espuma para promover o envolvimento mais fácil dos agregados.



Figura 2.13 – Unidade de produção de espuma (adaptado de EAPA, 2007)

Numa central contínua, a espuma de betume pode ser ininterruptamente produzida, o que evita a necessária limpeza com ar comprimido entre cada amassadura, imprescindível de executar nas centrais descontínuas.

A Shell refere que o sucesso das MBT produzidas com recurso à tecnologia de WMA[®] Foam depende da selecção criteriosa do betume duro e mole, recomendando também, por vezes, a introdução no primeiro estágio de mistura de um promotor da afinidade betume-agregado. Uma questão fundamental ainda neste estágio é evitar que a água atinja a interface da mistura ligante/agregado entrando no agregado. A Shell reportou poupanças de 30% de fuel, o que leva a reduções nas emissões de CO₂ de também 30%. Ensaio independentes confirmam esta afirmação (Larsen *et al.*, 2004).

Double Barrel[®] com opção Green

Desenvolvido pela *Astec Industries*, o sistema Double Barrel[®] com opção Green (em processo de obtenção de patente), consiste na utilização de um dispositivo acoplado ao sistema Double Barrel[®], tambor secador e misturador patenteado também por esta empresa, e que permite a produção de misturas betuminosas temperadas que, conforme referido por Fitts (2008),

permitem reduções da temperatura de produção de 10 a 30 °C. Trata-se de um processo onde uma pequena quantidade de água é adicionada à mistura usando um dispositivo capaz de microscopicamente espumar o betume (Figura 2.14).



Figura 2.14 – Double Barrel com opção Green e unidade de produção de espuma (adaptado de ASTEC, 2009)

Este acessório é constituído basicamente por um sistema de válvulas, câmara de expansão e bicos de injeção para produção da espuma de betume, sendo estes controlados por computador visando a adequação da taxa de espuma. Todo este sistema é rodeado de uma cisterna de aquecimento e circulação de óleo térmico. A injeção de água através dos bicos cria um vapor que rodeia o ligante resultando na formação de espuma e num enorme aumento do volume do betume. Esta tecnologia permite uma redução superior a 10 °C (temperatura de fabrico de 121 a 135 °C) na temperatura da mistura e compactação da MBT (Chowdhury and Button, 2008).

Habitualmente não necessitará de alterações na formulação da mistura, mas existem autores (Hurley and Prowell, 2008) que sugerem o uso de um dispositivo de produção de espuma em laboratório, e que sejam simuladas numa validação em laboratório as condições da central.

LEA – Low Energy Asphalt

A tecnologia LEA foi desenvolvida pela *Fairco* e pela *Eiffage* em França, que detinham já duas patentes nesta área (a *Eiffage*, desenvolveu os *Enrobes à Baisse Temperature* – EBT[®], e a *Fairco* criou os *Enrobes à Baisse Energie* – EBE[®]). Estas duas empresas criaram um grupo para a promoção das LEA na Europa, EUA e noutros países, a LEA-CO. A fim de se adaptarem aos tipos de centrais dos fabricantes de misturas betuminosas, podem ser fabricadas LEAs de acordo com 3 metodologias distintas (LEA 1, 2 e 3). Esta tecnologia foi largamente premiada a nível internacional, incluindo com o Prémio Mundial da AIPCR no ano de 2007.

O processo de produção das LEA é bastante distinto das MBQ, consistindo na secagem parcial do esqueleto granular do agregado e na capacidade do betume formar espuma em contacto com a água, auto-expandindo e melhorando o revestimento dos agregados. A temperatura da mistura resultante é de cerca de 95 °C. O conteúdo de água reduz a viscosidade da mistura, atribuindo-lhe uma boa trabalhabilidade, mesmo a essas temperaturas. Salienta-se que o betume utilizado no fabrico destas misturas é aditivado por agentes que auxiliem a formação de espuma, a afinidade betume-agregado e a trabalhabilidade (Olard and Noan, 2008).

A facilidade de adaptação desta tecnologia à quase totalidade das centrais de fabrico de misturas betuminosas reside na possibilidade da introdução sequenciada dos materiais segundo os três métodos citados anteriormente – LEA 1, 2 e 3. Estes métodos estão esquematizados na Figura 2.15.

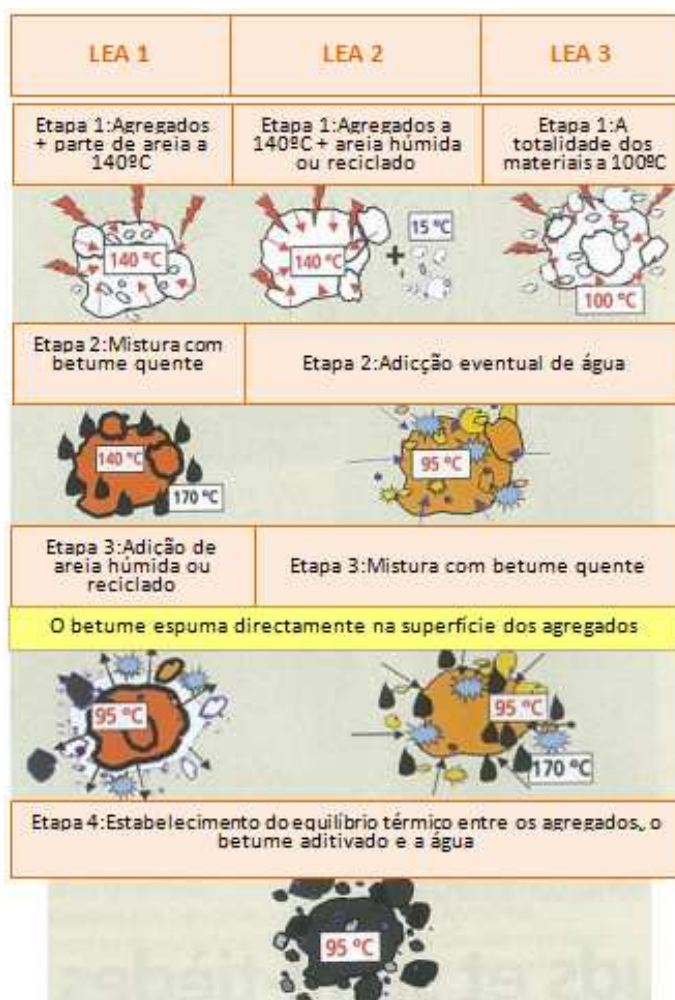


Figura 2.15 – Processo de produção das LEA (adaptado de FHWA, 2008)

Este tipo de processo de secagem parcial reduz consideravelmente a quantidade de energia necessária para remover a água (que consome muita energia).

A Figura 2.16 ilustra a vista geral de uma central de misturas betuminosas descontínua, exemplificando o método LEA 2, com introdução da areia directamente no misturador, explicando esta tecnologia.

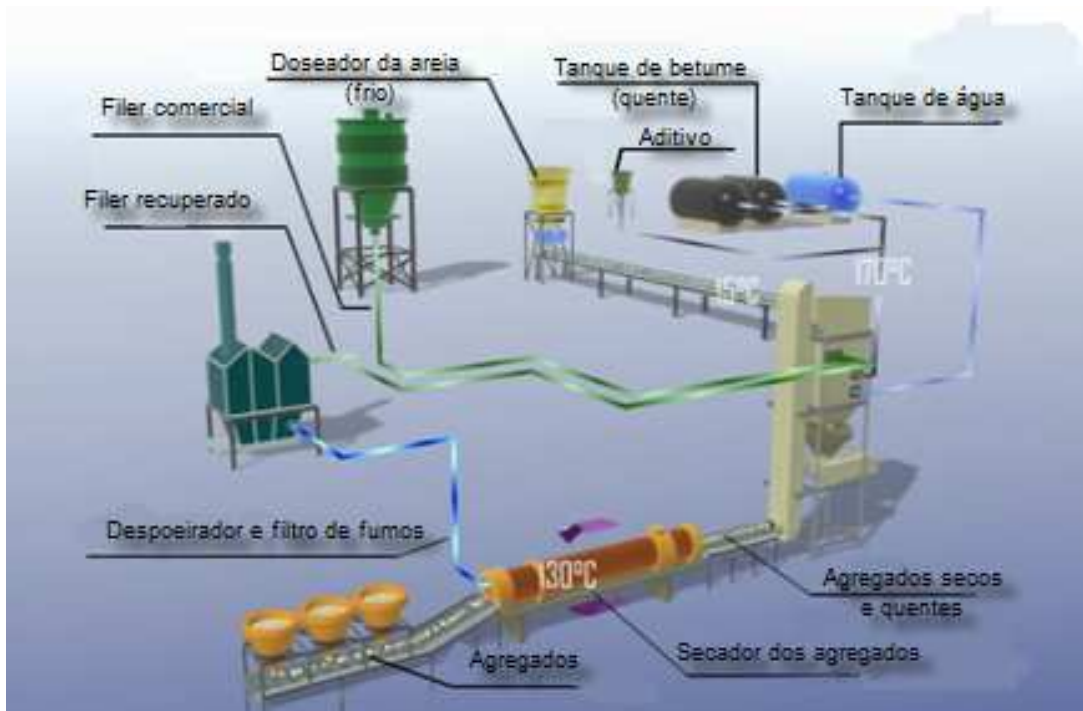


Figura 2.16 – Vista geral de uma central de misturas betuminosas descontínua, com introdução a frio directamente no misturador de areia (adaptado de lea-co, 2010)

A temperatura onde resulta o equilíbrio da mistura é ligeiramente inferior a 100 °C. De salientar que após todo o processo fica alguma água proveniente da recondensação, que auxilia a manutenção da trabalhabilidade da mistura mesmo a temperaturas inferiores à descrita anteriormente.

LEAB®

O processo LEAB® foi desenvolvido pela *Royal BAM Group* na Holanda. De acordo com a FHWA (2008) trata-se de uma comercialização da mistura de espuma de betume semi-quente, resultado da investigação conduzida anteriormente por Jenkins (2000). Em ensaios de laboratório, os agregados foram divididos em partículas grossas e finas, e a água foi adicionada ao conjunto de forma a facilitar o revestimento, sendo que a mistura foi realizada

em duas fases. Este mesmo procedimento foi testado inicialmente *in situ*, mas sem sucesso, pelo que foi necessário aperfeiçoar o processo até garantir bons resultados em campo. Assim, no processo LEAB[®] nenhuma água adicional é acrescentada aos agregados, que são secos a uma temperatura de 95 °C.

A espuma de betume é produzida numa unidade semelhante à apresentada na Figura 2.17, sendo que a BAM usa uma série de seis destes bicos para produzir a LEAB[®]. Estes bicos são retrácteis para se poderem retirar quando estiverem a ser produzidas MBQ.



Figura 2.17 – Série de 6 bicos retráteis de injeção de espuma da BAM: LEAB[®] (adaptado de FHWA, 2008)

Imediatamente antes da formação de espuma deve ser adicionado um aditivo à base de aminas, semelhante ao usado para a produção de emulsões, numa quantidade de 0,5% do peso do betume. Este aditivo tem como objectivo melhorar a estabilidade da espuma de betume e promover a afinidade betume-agregado.

Na Holanda cerca de 50% de RA é actualmente incorporado nas misturas betuminosas temperadas e a quente. A empresa BAM costuma aquecer o RA num tambor secador paralelo, a uma temperatura de 110 a 115 °C. Neste método são obtidas poupanças energéticas de 40% com agregados virgens e de 30% com a mistura contendo 50% de RA.

Ultrafoam GX[®]

A metodologia desenvolvida e patenteada pela *Gencor Industries* consiste numa tecnologia onde se procede à instalação de um dispositivo capaz de criar, através da introdução de

betume e vapor de água a taxas de fluxo, pressões e temperaturas distintas, espuma de betume. Este mecanismo (Figura 2.18) pode ser acoplado à linha de betume previamente existente na central.



Figura 2.18 – Dispositivo para execução da espuma de betume da Gencor (adaptado de Gencor, 2009)

Desta forma, é possível manter o ratio pretendido entre o ligante e a água para qualquer produção da central, criando uma espuma de betume estável e consistente.

De forma sumária, neste Capítulo 2 foi feita uma resenha das principais tecnologias existentes na actualidade para produção de misturas betuminosas temperadas, bem como das suas principais vantagens e dos meios utilizados para a sua produção em laboratório e/ou em central. Após realização desta pesquisa bibliográfica sobre MBTs, foi possível definir quais as tecnologias a seleccionar para desenvolvimento do trabalho experimental apresentado nos Capítulos seguintes desta tese.

3. ESTUDO DA COMPOSIÇÃO E DO DESEMPENHO LABORATORIAL DAS MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS

3.1. Introdução

Em seguida descreve-se de forma sucinta, mas organizada, quais os diversos subcapítulos deste Capítulo 3, explicando qual o objectivo de cada uma dessas partes do trabalho até chegar ao resultado final do Capítulo, cujo objectivo é encontrar as condições de produção ideais das diversas misturas em estudo, para realização dum trecho experimental.

No Subcapítulo 3.2. foi feito um estudo exaustivo do comportamento dos ligantes aditivados a utilizar, dado que é essa a principal variável modificada em relação à mistura convencional. Assim, optou por se fazer diversos ensaios menos usuais, incluindo a determinação da viscosidade a várias temperaturas e a determinação das propriedades reológicas. Outro objectivo foi ter uma primeira percepção da quantidade óptima de aditivo a utilizar em cada caso, e se os aditivos funcionam pela modificação da viscosidade e, nesse caso, qual a redução de temperatura espectável apenas com base na análise da viscosidade.

No Subcapítulo 3.3. faz-se a caracterização dos agregados e da sua afinidade ao ligante. Esta avaliação foi importante para apoiar a análise do desempenho das misturas nas fases seguintes, pois alguns problemas de desempenho podem surgir em todas as misturas (a quente e temperadas) devido aos agregados utilizados, e não devido à modificação do ligante.

No Subcapítulo 3.4. faz-se a formulação da mistura convencional a quente. Este passo foi fundamental para se determinar a composição das diversas misturas. A composição manteve-se em todas as misturas estudadas para garantir que as únicas variáveis seriam o tipo de ligante utilizado e a temperatura de produção da mistura. Além disso, o estudo de composição foi executado intencionalmente sobre a mistura betuminosa convencional uma vez que não existem procedimentos normalizados para a formulação de MBT.

No Subcapítulo 3.5 faz-se um estudo da compactabilidade das diversas misturas para validar a composição escolhida (nomeadamente a percentagem de aditivo) e para definir as condições de produção das misturas temperadas, particularmente a redução de temperatura de produção.

No Subcapítulo 3.6 avalia-se o desempenho das misturas em estudo laboratorial, para confirmar se estas poderiam ser aplicadas de forma adequada no trecho experimental sem problemas relacionados com o seu desempenho.

3.2. Caracterização dos Ligantes Betuminosos

3.2.1. Descrição Inicial do Estudo

No presente estudo, foram investigados dois aditivos distintos de forma a avaliar a melhor composição a usar para a formulação e produção das misturas betuminosas temperadas aqui caracterizadas, e adaptadas às condições nacionais. Neste Subcapítulo 3.2. é retratado todo o trabalho experimental de caracterização dos ligantes utilizados no âmbito deste trabalho.

Devido às condicionantes associadas à componente experimental deste trabalho, relacionadas com a obra seleccionada ser construída com um ligante de gama de penetração B50/70, todo o trabalho de caracterização das misturas foi desenvolvido com este betume.

Relativamente a este capítulo, e mais concretamente à selecção, produção e caracterização dos ligantes, foram investigados diferentes betumes de pavimentação de forma a melhor compreender o seu comportamento com os aditivos seleccionados.

Os betumes utilizados, para além do B50/70, foram os betumes da gama de penetração B35/50, e B100/150 (classificados de acordo com a Norma Europeia 12591). Para a “modificação” destes três betumes, foram utilizados dois aditivos comerciais com a designação de “Cecabase[®]” e “Sasobit[®]”, descritos anteriormente, em quantidades controladas de forma a determinar a sua influência nas propriedades finais do ligante.

3.2.2. Selecção dos Ligantes e dos Aditivos a Utilizar

A selecção dos aditivos a utilizar neste trabalho baseou-se na experiência de utilização existente internacionalmente, no que diz respeito ao Sasobit[®], e nas vantagens associadas à facilidade de utilização e modo de actuação do Cecabase[®], que serão aprofundadas no capítulo relativo à validação na produção.

Treze amostras de ligantes modificados foram preparadas em laboratório para uma completa caracterização (penetração, ponto de amolecimento, viscosidade dinâmica e reologia). Baseado nas recomendações dos produtores dos aditivos, foram adicionadas a essas amostras três percentagens de cada aditivo nos ligantes B35/50 e B50/70 (2, 3 e 4% s/l, de Sasobit[®] e 0,2, 0,3 e 0,4% s/l, de Cecabase[®]). No ligante B100/150 foi apenas adicionada uma percentagem (4% s/l) de Sasobit[®] visto este betume ter sido utilizado apenas com o intuito experimental de avaliar a sua modificação com este aditivo a nível das suas propriedades.

No sentido de determinar a percentagem óptima de aditivo, foram realizados vários ensaios aos ligantes resultantes, tal como se explica nos parágrafos seguintes. Não existindo recomendações para a metodologia de produção em laboratório dos betumes modificados, estes foram obtidos através da mistura de cada ligante com o aditivo, seguindo-se uma agitação durante um período de cerca de cinco minutos e a uma temperatura de 130 °C.

O Cecabase[®] é um aditivo composto por agentes tensioactivos de superfície que, quando misturados com o betume, permitem a redução da temperatura de aplicação em cerca de 50 °C, sem qualquer efeito no desempenho da mistura. Comparando com o processo de produção convencional, o uso deste aditivo reduz o consumo de energia em cerca de 20 a 50%, consoante o tipo de produção, e diminui significativamente a emissão de poeiras. Também, segundo os produtores, a incorporação deste aditivo na produção de misturas betuminosas (2 a 4 Kg por tonelada de ligante), possibilita a redução das temperaturas de aplicação para os 120 °C, salvaguardando que as propriedades das misturas temperadas sejam iguais às das misturas convencionais produzidas a 160-180 °C (CECA, 2008).

O Sasobit[®] é um “Fischer-Tropsch (F-T)” ou cera sintética, criada a partir do processo de “gaseificação do carvão”, e que tem sido usado como auxiliar de compactação e redutor de temperatura. É um aditivo orgânico de baixo ponto de amolecimento que altera quimicamente a curva de viscosidade-temperatura do ligante (Button *et al.*, 2007). Este aditivo é completamente solúvel no betume, a temperaturas superiores a 115 °C, resultando numa solução homogénea com o betume base, sob agitação, produzindo uma acentuada redução da viscosidade do betume.

3.2.3. Propriedades Básicas dos Ligantes

No sentido de classificar os ligantes usados neste estudo, foi levada a cabo uma caracterização elementar, de acordo com a norma EN 12591. A caracterização incluiu ensaios de penetração a 25°C (de acordo com a norma EN 1426) e ensaios de ponto de amolecimento (também conhecidos por Anel e Bola ou A&B, em cumprimento com a norma EN 1427).

Os resultados obtidos nos betumes convencionais de pavimentação e nos ligantes modificados com diferentes percentagens de aditivo estão resumidos no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Resultados comparativos das diferentes propriedades dos ligantes

Betume	Tipo de aditivo	% de aditivo (s/l)	Pen (dmm)	Δ Pen (dmm)	Δ Pen (%)	A&B (°C)	Δ A&B (°C)	Δ A&B (%)
B35/50	Nenhum	–	41.3	0.0	0%	56.7	0.0	0%
	Sasobit®	2	32.0	-9.3	-22%	72.6	16.0	28%
		3	33.1	-8.2	-20%	81.5	24.9	44%
		4	28.6	-12.6	-31%	91.9	35.3	62%
	Cecabase®	0.2	44.9	3.6	9%	55.8	-0.9	-2%
		0.3	41.8	0.5	1%	55.4	-1.3	-2%
		0.4	43.0	1.7	4%	55.4	-1.3	-2%
B50/70	Nenhum	–	58.9	0.0	0%	51.6	0.0	0%
	Sasobit®	2	45.2	-13.7	-23%	69.7	18.1	35%
		3	41.4	-17.5	-30%	81.5	29.9	58%
		4	36.6	-22.3	-38%	87.5	36.0	70%
	Cecabase®	0.2	61.1	2.3	4%	51.1	-0.4	-1%
		0.3	63.6	4.8	8%	50.6	-1.0	-2%
		0.4	63.6	4.8	8%	50.1	-1.5	-3%
B100/150	Nenhum	–	143.4	0.0	0%	44.3	0.0	0%
	Sasobit®	4	68.4	-75.1	-52%	87.0	42.8	97%

Os resultados do Quadro 3.1 estão graficamente ilustrados nas Figuras de 3.1 a 3.5. Nas Figuras 3.1 e 3.2 pode observar-se a evolução dos valores de penetração a 25 °C e do ponto de amolecimento com o incremento da percentagem de aditivo em cada um dos tipos de betume de pavimentação utilizados (B35/50, B50/70 e B100/150).

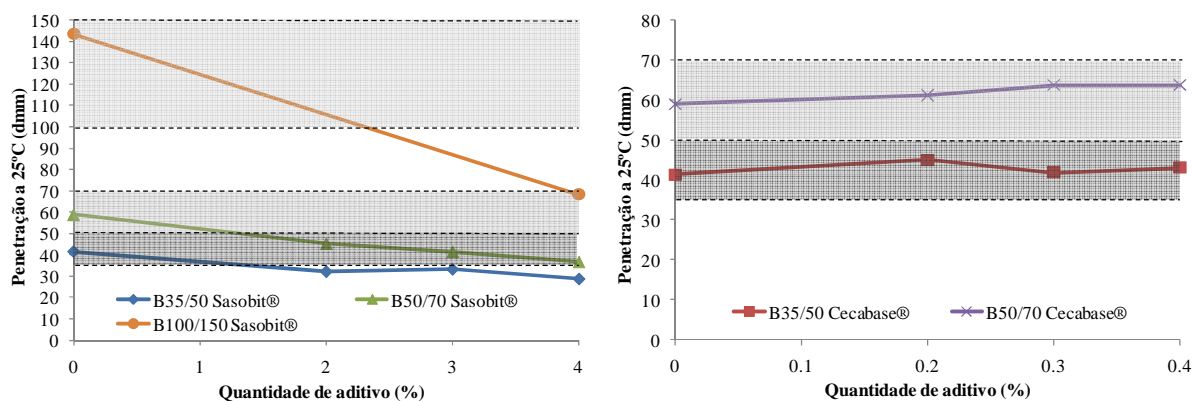


Figura 3.1 – Evolução do valor da penetração do ligante com o incremento de aditivo

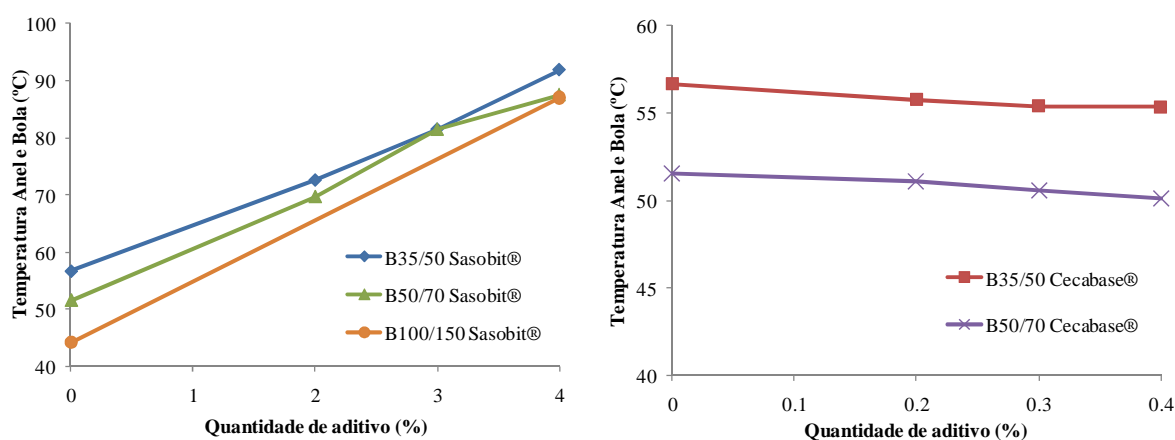


Figura 3.2 – Evolução do ponto de amolecimento do ligante com o incremento de aditivo

Tal como se pode verificar nas Figuras 3.1 e 3.2, a adição até 0,4% de Cecabase® ao betume original não muda a sua classificação, ou seja, a penetração e ponto de amolecimento são pouco alterados, enquanto a adição de Sasobit® pode modificar significativamente as propriedades do ligante, alterando a gama de penetração, tal como se verifica, por exemplo, na adição de 4% de Sasobit® ao ligante B100/150. Neste caso, e tal como seria de esperar, a gama de penetração a 25 °C diminuiu (transformando o B100/150 num B50/70) e o ponto de amolecimento aumentou para 87 °C (valor habitual para um betume duro do tipo B20/30).

A influência dos aditivos utilizados no valor de penetração e na temperatura de amolecimento pode ser melhor entendido através das Figuras 3.3 e 3.4, onde está ilustrada a influência da quantidade de aditivo nas propriedades do ligante. Verifica-se que a adição de Sasobit® altera mais as propriedades do ligante do que o Cecabase® (principalmente a temperatura A&B), sendo que apenas o primeiro aditivo “endurece” o betume.

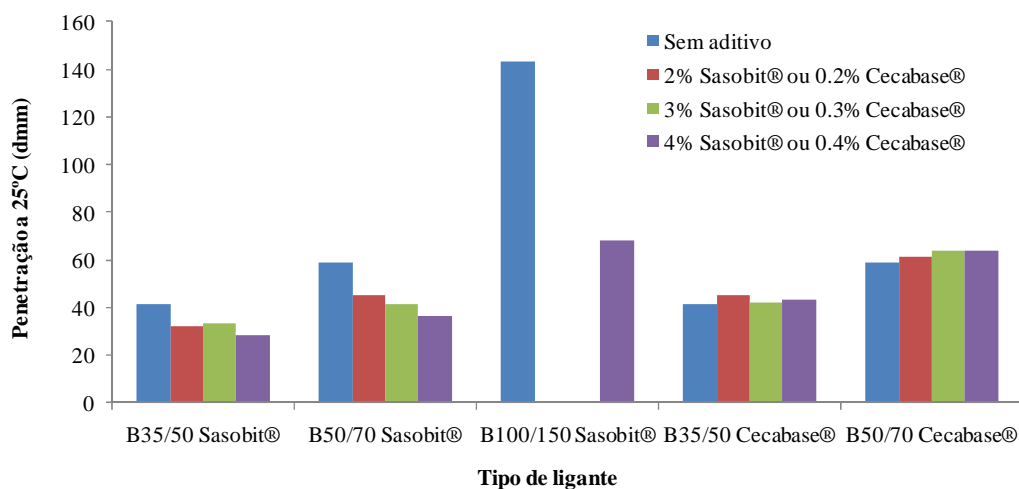


Figura 3.3 – Influência da quantidade e tipo de aditivo no valor da penetração dos ligantes

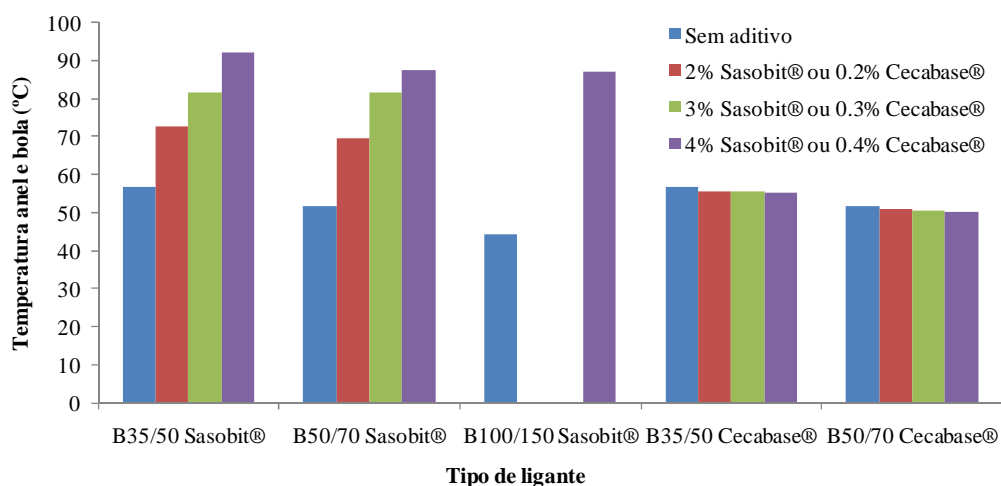


Figura 3.4 – Influência da quantidade e tipo de aditivo no ponto de amolecimento do ligante

A Figura 3.5 demonstra a variação dos valores de penetração e ponto de amolecimento, para os ligantes estudados.

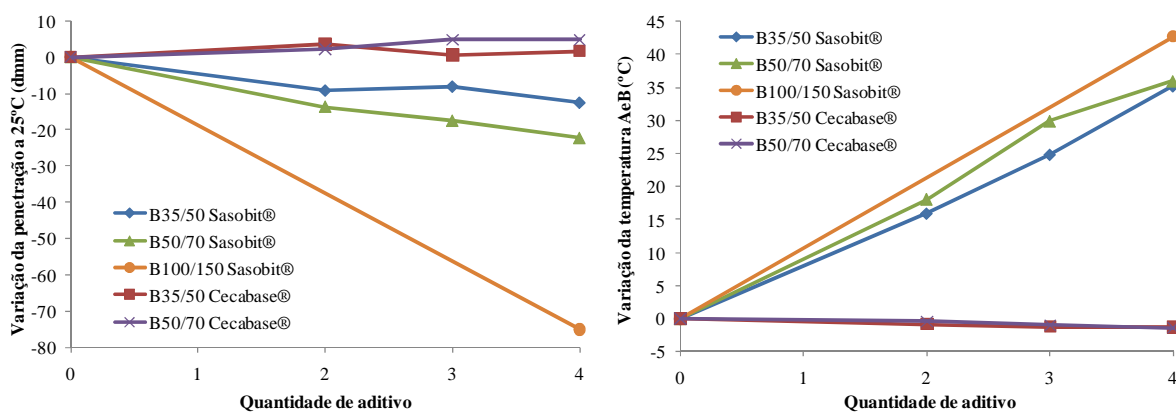


Figura 3.5 – Variação dos valores de penetração e ponto de amolecimento dos ligantes

Pela análise da figura anterior pode concluir-se que o Cecabase[®] tem uma influência irrelevante nas propriedades dos ligantes modificados, enquanto o Sasobit[®] tem grande relevância na alteração dessas mesmas propriedades.

3.2.4. Viscosidade Dinâmica dos Ligantes (Viscosímetro Rotacional)

De forma a avaliar as propriedades dos diversos ligantes sujeitos às altas temperaturas (100 a 170 °C) a que as misturas betuminosas são produzidas e aplicadas, a sua viscosidade dinâmica foi determinada usando o viscosímetro rotacional (de acordo com a norma europeia EN 13302 para determinação da viscosidade de betumes com um viscosímetro rotacional). A gama típica de temperaturas de ensaio no viscosímetro coaxial usando o mesmo equipamento situa-se entre os 50 e 250 °C.

Durante o ensaio, a resistência à rotação da ponteira da haste rotativa no interior do recipiente contendo a amostra de ligante mede a sua viscosidade dinâmica. De acordo com a EN 13302, após ser atingida a temperatura de ensaio e se baixar a ponteira da haste rotativa para o interior do ligante, a temperatura deve estabilizar após 15 a 30 minutos (de acordo com a prática laboratorial o equilíbrio é atingido após 18 minutos). Depois, e por fim, são executadas 3 leituras nos 3 minutos seguintes para cada temperatura estudada. A viscosidade dinâmica de cada temperatura corresponde à média aritmética das três leituras verificadas entre o décimo oitavo e vigésimo primeiro minuto do ensaio.

A Figura 3.6. sintetiza o método usado para avaliar a viscosidade dinâmica dos ligantes a diferentes temperaturas, cuja área sombreada demonstra a determinação desta propriedade (2,96 Pa.s) à temperatura de 110 °C. A linha tracejada representa a evolução teórica da viscosidade dinâmica caso a temperatura de ensaio tivesse sido gradualmente aumentada desde os 110 a 170 °C. Pode ainda ser observado que a viscosidade estabilizou, em cada temperatura de ensaio, após cerca de 21 minutos (18 minutos mais 3 minutos), como acima mencionado.

A evolução teórica da viscosidade dos diversos betumes, à temperatura de ensaio, é o resultado final dos ensaios realizados visando a análise da quantidade óptima de aditivo, quer de Sasobit[®] como de Cecabase[®], necessária para produzir e aplicar as misturas betuminosas temperadas a baixas temperaturas.

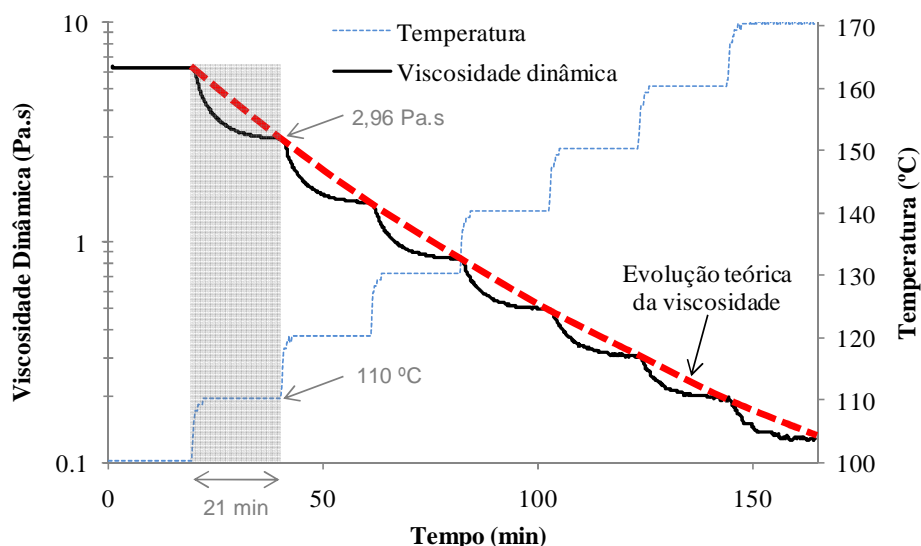


Figura 3.6 – Método utilizado para determinar a viscosidade a diferentes temperaturas com o viscosímetro rotacional

A avaliação da viscosidade dinâmica em função da temperatura para os diferentes tipos de betumes de pavimentação (B35/50, B50/70 e B100/150), antes e depois da sua modificação com os aditivos incorporados, pode ser observada nas Figuras 3.7 e 3.8, respectivamente com o Sasobit® e Cecabase®. Embora tenham sido usadas outras quantidades de aditivo para alterar o betume, apenas são apresentados alguns valores (2% e 4%) para demonstrar a progressão da viscosidade com a adição das diferentes quantidades de Sasobit®. Para os ligantes modificados com o Cecabase®, apenas a adição máxima de 0,4% é apresentada no sentido de simplificar a figura.

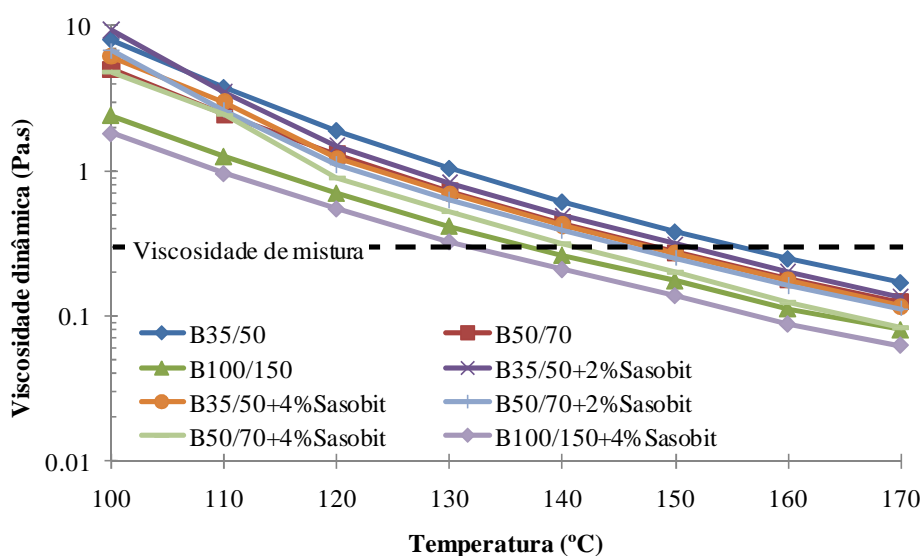


Figura 3.7 – Viscosidade dinâmica dos ligantes com Sasobit® (viscosímetro rotacional)

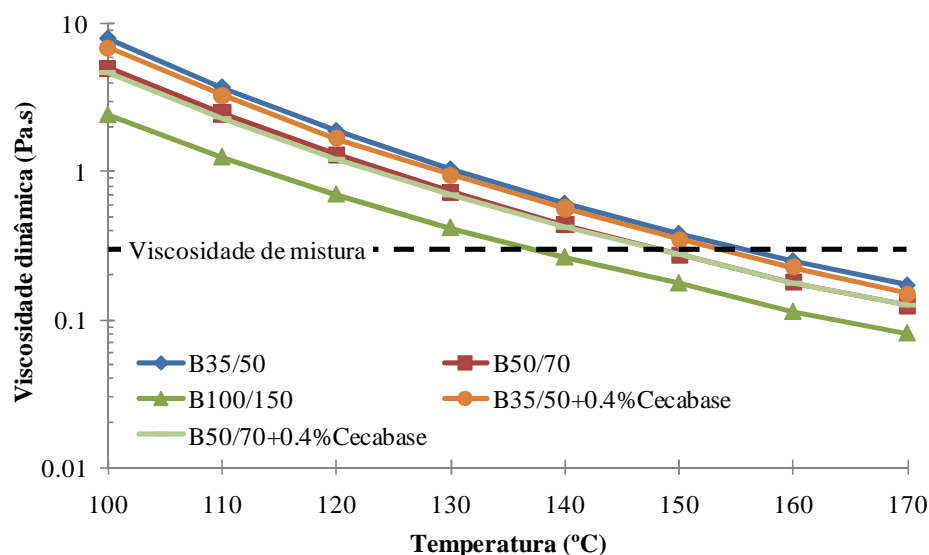


Figura 3.8 – Viscosidade dinâmica dos ligantes com Cecabase® (viscosímetro rotacional)

A Figura 3.7. mostra que a adição do Sasobit® reduz a viscosidade dinâmica do ligante à temperatura de produção e aplicação. Ainda que um dos objectivos da utilização do Sasobit® nas misturas betuminosas temperadas seja reduzir as temperaturas de aplicação, as alterações observadas nestas temperaturas são inferiores às presenciadas em condições de serviço (penetração e principalmente na temperatura A&B).

Analisando as temperaturas na linha de equi-viscosidade de 0,3 Pa.s (viscosidade máxima para mistura), constata-se que a adição de 2% de Sasobit® permite uma redução de 2 a 5 °C comparativamente com os betumes originais, enquanto os ligantes modificados com 4% de Sasobit® permitem reduções superiores (entre 7 e 10 °C).

Com base nos resultados de penetração e A&B (norma EN 12591), um ligante de penetração B50/70 modificado com 4% de Sasobit® pode ser enquadrado numa gama de penetração B35/50, assim como um ligante de penetração B100/150 modificado com 4% de Sasobit® pode ser considerado como um betume de penetração B50/70. Analisando a redução da temperatura da mistura, na mesma linha de equi-viscosidade de 0,3 Pa.s, para esses ligantes “equivalentes”, já pode ser observada uma redução superior, de 15 a 18 °C.

Considerando o objectivo principal das MBT, é possível concluir que a máxima redução de temperatura foi alcançada ao adicionar 4% de Sasobit® a betumes mais moles (B50/70 e B100/150), que assim serão caracterizados por ensaios reológicos no Subcapítulo 3.2.5).

Tal como pode ser verificado na Figura 3.8., a adição de até 0,4% de Cecabase[®] ao betume original pouco ou nada altera a viscosidade dinâmica, em condições de temperatura típicas de aplicação. Na verdade, apenas foi possível observar uma pequena redução de viscosidade nos betumes de penetração B35/50 após adição de 0,4% de Cecabase[®], o que permite a diminuição de apenas 2 °C na mesma linha de equi-viscosidade de 0,3 Pa.s. De facto, o aditivo Cecabase[®] não altera as propriedades do ligante (penetração, temperatura de A&B e viscosidade) às temperaturas estudadas, e por esse motivo estes betumes modificados não serão caracterizados através de ensaios reológicos.

Assim, a quantidade do aditivo Cecabase[®] a utilizar será baseada nas indicações do fornecedor, optando-se pela introdução de 0,3% s/l, sendo que a optimização da temperatura de produção resultará de estudo aprofundado sobre a compactabilidade da mistura betuminosa, que será apresentado posteriormente no Subcapítulo 3.5.

3.2.5. Propriedades Reológicas dos Ligantes (DSR)

No sentido de determinar as alterações ocorridas nos ligantes betuminosos aquando da adição do Sasobit[®], três betumes convencionais (B35/50, B50/70 e B100/150), três betumes modificados (B50/70 com 2 e 4% de Sasobit[®] e B100/150 com 4% de Sasobit[®]) e o aditivo Sasobit[®] puro foram ensaiados num reómetro de corte dinâmico (DSR), que é capaz de medir as propriedades reológicas desses materiais de acordo com a norma europeia EN 14770, que define o método para medição do módulo complexo do betume no DSR.

A medição das propriedades reológicas dos ligantes foi executada num DSR rotativo, de pratos paralelos, com 40 mm de diâmetro e 1 mm de abertura entre pratos (com compensação manual de abertura a cada temperatura).

O reómetro foi preparado para o ensaio em modo oscilatório, de forma a garantir uma resposta dinâmica do provete, certificando que o mesmo era ensaiado na zona de comportamento linear, nos intervalos escolhidos para a temperatura e frequência, 25 a 170 °C, e 0,1 a 10 Hz, respectivamente. Nestas condições, foram executados ensaios preliminares a diferentes temperaturas e frequências no sentido de seleccionar valores de tensão aplicada pelo reómetro para os quais o ligante está no domínio linear (as propriedades medidas não devem diferir mais que 5% para os valores de tensão escolhidos).

Baseado neste estudo preliminar, os valores de tensão seleccionados para realizar os ensaios DSR variaram entre 1000 Pa à temperatura de 25 °C e 3 Pa à temperatura de 170 °C.

Os ensaios DSR começaram à temperatura mais baixa seleccionada e à frequência menor, evoluindo gradualmente até aos maiores valores de temperatura e frequência em estudo. Concluído cada patamar de temperatura, foi possível avançar para a temperatura seguinte aplicando em gradiente térmico inferior a 5 °C por minuto. Durante os ensaios aplicou-se uma tensão de corte no provete (previamente definida) e mediu-se a extensão de corte resultante.

Os resultados finais dos ensaios realizados envolvem a determinação do módulo de corte complexo ($|G^*|$ – relação entre a tensão a extensão de corte) e do ângulo de fase (δ – diferença de fase entre a tensão e a extensão de corte) dos ligantes com uma gama de variação das frequências e temperaturas de ensaio.

Os resultados dos ensaios reológicos no DSR são apresentados nas Figuras 3.9 e 3.10 (o módulo complexo e o ângulo de fase, respectivamente) para o betume B50/70 (antes e após adição de 4% de Sasobit®) e para o Sasobit® puro, de forma a exemplificar as alterações verificadas sob acção deste aditivo.

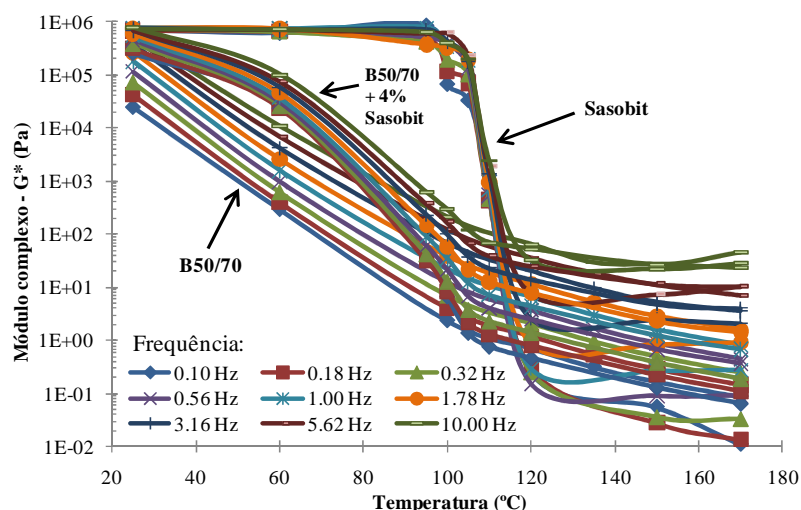


Figura 3.9 – Módulo complexo de um ligante modificado com Sasobit® a diferentes temperaturas e frequências (DSR)

Outro resultado obtido do DSR é a viscosidade dinâmica do material em estudo, apresentada na Figura 3.11 para o betume original, betume modificado e para o Sasobit® puro.

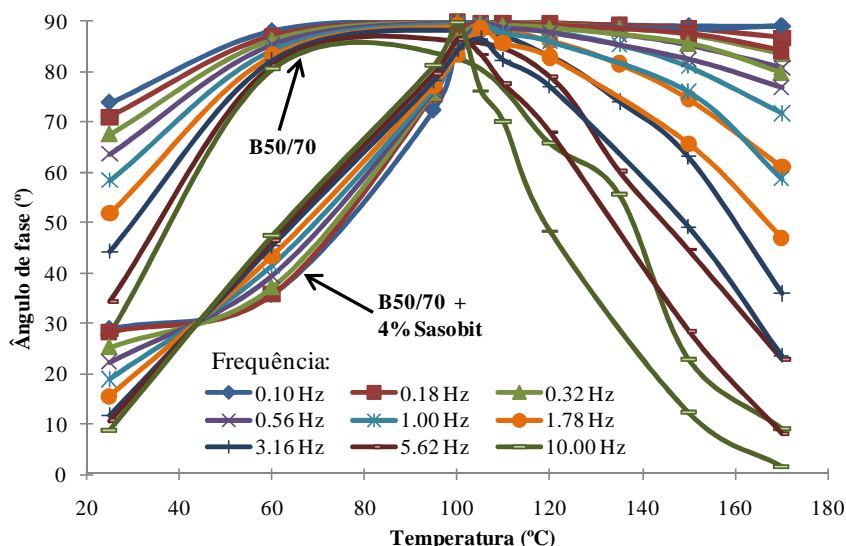


Figura 3.10 – Ângulo de fase de um ligante modificado com Sasobit® a diferentes temperaturas e frequências (DSR)

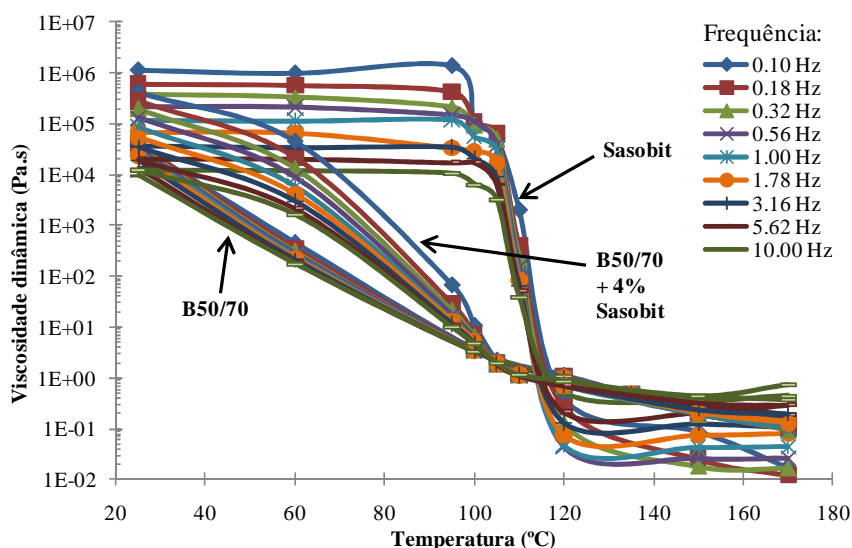


Figura 3.11 – Viscosidade de um ligante modificado com Sasobit® a diferentes temperaturas e frequências (DSR)

O módulo de corte complexo do Sasobit® é muito elevado (1 MPa), constante e independente da frequência, até à sua temperatura de fluidificação (102 °C), comportando-se essencialmente como um material sólido e elástico. Ligeiramente acima dessa temperatura o módulo complexo diminui rapidamente e o Sasobit® torna-se num material líquido com alguma viscosidade residual, muito mais dependente da frequência. A viscosidade dinâmica do Sasobit® tem uma evolução similar ao módulo, excepto para variações de frequência inferiores a 102 °C.

Observou-se que a baixas temperaturas, usualmente abaixo dos 100 °C (quando os materiais têm comportamento visco-elástico e ainda não estão líquidos), todos os materiais ensaiados apresentaram viscosidades elevadas para baixas frequências, acontecendo o contrário a temperaturas mais elevadas.

O betume convencional apresenta um módulo complexo que varia com a temperatura e com a frequência de ensaio. Para a temperatura de 25 °C, o módulo complexo do betume convencional é ligeiramente inferior ao do Sasobit[®] (sendo praticamente igual a 10 Hz mas ligeiramente mais baixo a 0,1 Hz). Esta diferença aumenta para temperaturas superiores (entre 50 e 90 °C), o que justifica o grande incremento da temperatura de amolecimento A&B para betumes modificados com Sasobit[®]. Acima dos 115 °C o betume convencional apresenta um módulo complexo ligeiramente superior ao Sasobit[®], sendo esta diferença insuficiente para permitir uma grande redução na temperatura de produção das MBT (conforme se referiu anteriormente, a redução necessária de temperatura apenas ocorre usando betumes mais moles na produção do ligante modificado).

A viscosidade dinâmica do betume original, não varia significativamente para diferentes frequências de ensaio, sendo que o ângulo de fase é muito dependente da variação destas frequências (sendo o comportamento mais elástico e menos viscoso em frequências mais elevadas). Constatou-se que este material tem um comportamento visco-elástico numa gama de temperaturas entre os 25 a 60 °C, sendo que apresenta um comportamento viscoso com uma elasticidade residual no intervalo de 60 a 100 °C, e comportando-se finalmente como um líquido a temperaturas mais elevadas.

A reologia do ligante modificado com Sasobit[®] é baseada essencialmente no comportamento do betume original, modificado pelo Sasobit[®] sobretudo para temperaturas entre 25 e 100 °C. Na verdade, para essas temperaturas (e sobretudo para temperaturas próximas do ponto de amolecimento) o ligante modificado tem um incremento substancial do seu módulo e viscosidade dinâmica. A presença do Sasobit[®] no ligante modificado aumenta a sua elasticidade, reduzindo os valores do ângulo de fase e limitando o comportamento viscoso às temperaturas mais elevadas. Nas temperaturas superiores a 100 °C (na produção das MBT) apenas se notaram pequenas diferenças de comportamento entre o betume modificado e o betume original.

No sentido de facilitar a análise dos resultados reológicos, seleccionou-se a frequência de referência de 1 Hz (aproximadamente os 10 rad/s recomendados pelo SHRP (1997)) para comparar diferentes materiais ensaiados no DSR. Por conseguinte, a Figura 3.12 demonstra a comparação das propriedades reológicas (módulo complexo e ângulo de fase) do betume original B50/70, dos ligantes modificados produzidos com esse betume (entre 2 a 4% de aditivo) e do aditivo Sasobit[®] puro.

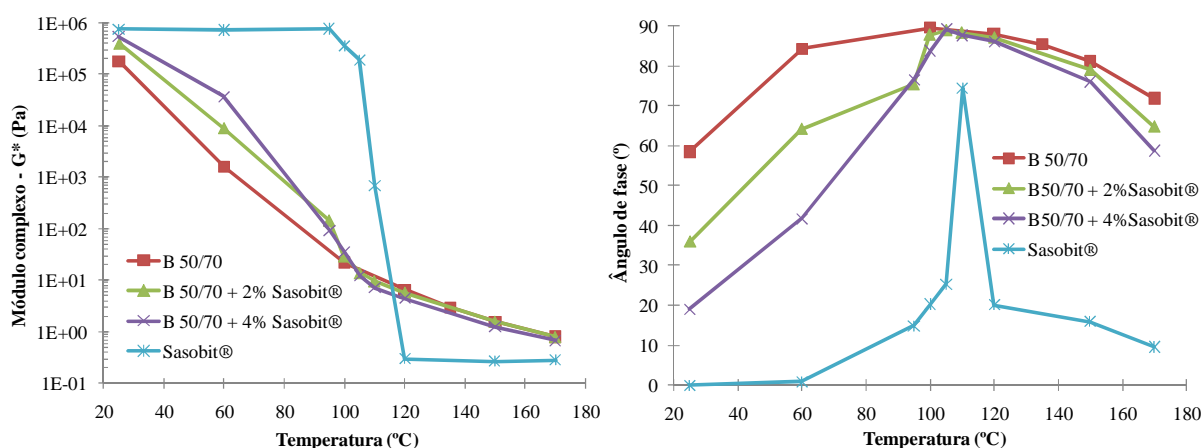


Figura 3.12 – Influência da quantidade de Sasobit[®] nas propriedades reológicas do ligante (DSR)

Verificou-se que o Sasobit[®] é essencialmente um material elástico (reduzido ângulo de fase), excepto em temperaturas próximas do seu ponto de amolecimento (102 °C). Em contrapartida, o betume original apresenta um comportamento essencialmente viscoso a 1 Hz para as temperaturas ensaiadas.

Ao modificar o betume original com Sasobit[®], a parte elástica do módulo complexo do betume modificado aumenta em proporção directa com o aumento de quantidade de aditivo incorporado, o que é visível essencialmente para temperaturas entre 25 e 80 °C.

Em termos de aditivos para MBT o desejável será conseguir-se uma redução do módulo complexo nas temperaturas de aplicação, ou seja, habitualmente acima dos 120 °C. No entanto, após análise comparativa desta característica, pode verificar-se que no que concerne à modificação com Sasobit[®] apenas uma pequena diminuição do módulo é conseguida. Assim sendo, a maior percentagem de Sasobit[®] estudada (4%) deve ser usada para a modificação do

ligante no sentido de assegurar uma maior redução do módulo complexo a temperaturas elevadas, maximizando a redução das temperaturas de aplicação das MBT.

Foi previamente observado que um betume de penetração B50/70 modificado com 4% de Sasobit® pode ser entendido com um ligante B35/50 em condições de serviço, assim como um betume de penetração B100/150 com incorporação de 4% de Sasobit® pode ser considerado como um betume B50/70. A comparação entre as propriedades reológicas (módulo complexo e ângulo de fase) destes ligantes é apresentada nas Figuras 3.13 e 3.14, para os ligantes modificados com 4% de Sasobit®, B50/70 e B100/150 respectivamente.

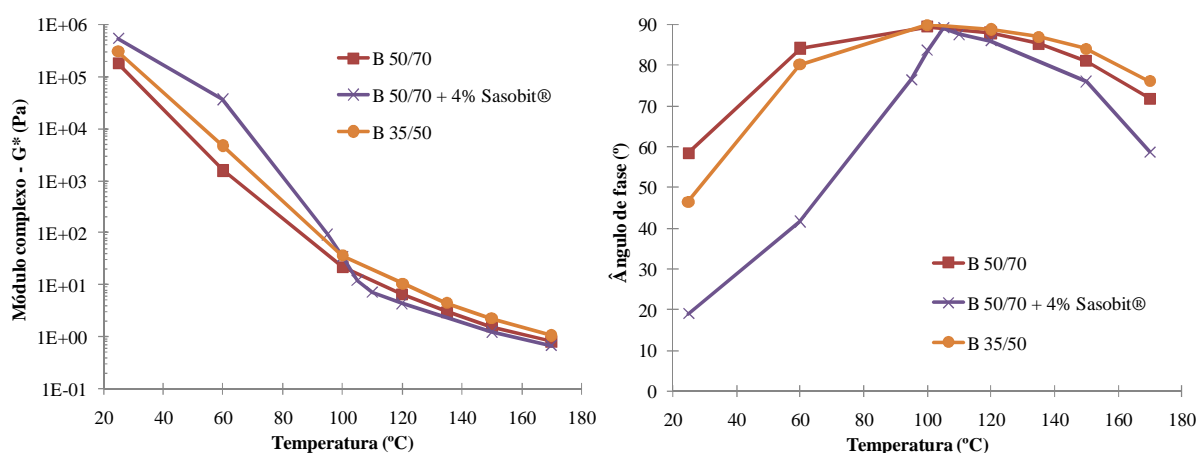


Figura 3.13 – Propriedades reológicas do betume B35/50 vs betume B50/70 modificado com Sasobit® (DSR)

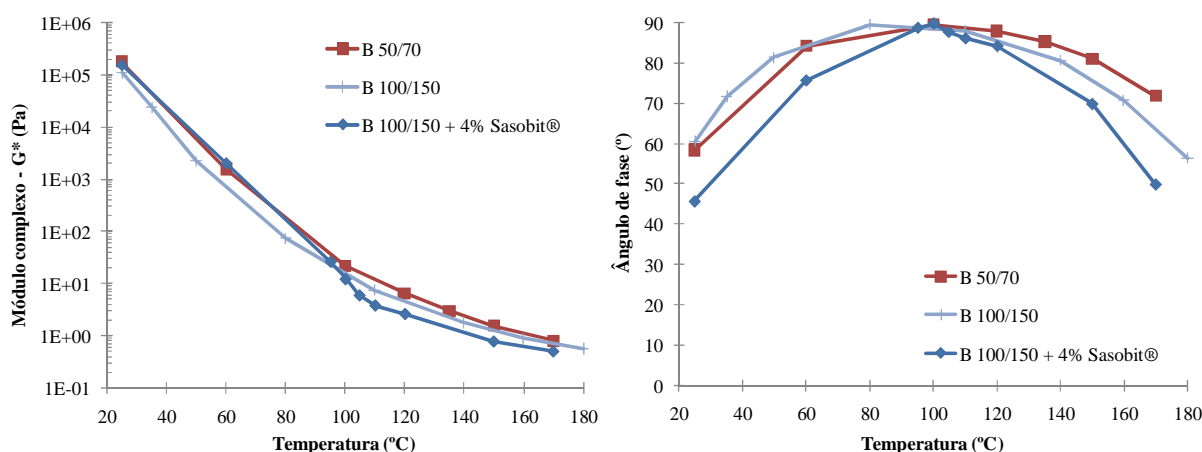


Figura 3.14 – Propriedades reológicas do betume B50/70 vs betume B100/150 modificado com Sasobit® (DSR)

Os resultados da análise do módulo complexo confirmam que os ligantes com betumes moles modificados com Sasobit® têm um módulo similar ou até mesmo superior ao betume original mais duro, permitindo com a sua utilização obter maiores reduções nas temperaturas de aplicação das MBT e consequentemente obter propriedades que mais se assemelhem às misturas betuminosas produzidas a uma temperatura convencional.

Ademais, observou-se que os betumes modificados com Sasobit®, ainda que produzidos com betumes mais moles, têm módulos elásticos mais elevados (mais baixos ângulos de fase) comparativamente aos betumes originais mais duros.

A parte real do módulo de corte complexo $|G^*|$ é denominada de G' (módulo elástico ou de armazenamento) e está associada com a componente do comportamento elástico do material. A parte imaginária do módulo de corte complexo é G'' (módulo viscoso ou módulo de perda) está associada com a componente de comportamento viscoso do material.

A representação gráfica de G' (módulo elástico) vs G'' (módulo viscoso) dos diferentes ligantes está ilustrada na Figura 3.15, onde é possível avaliar a influência do aditivo Sasobit® no comportamento reológico do betume para as temperaturas de serviço.

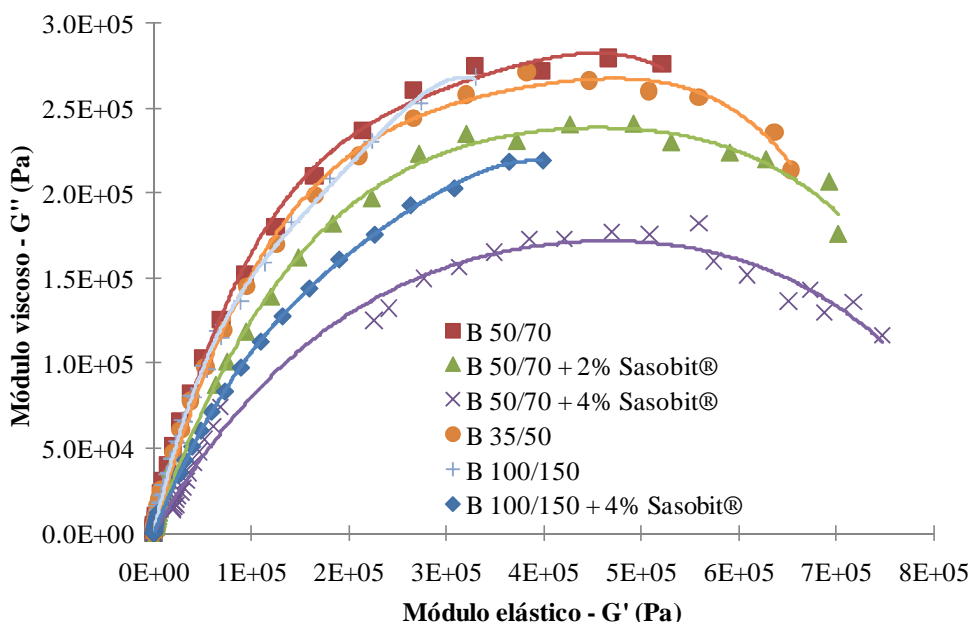


Figura 3.15 – Apresentação gráfica do estudo dos ligantes baseado nas suas propriedades reológicas (DSR)

Observa-se que o comportamento visco-elástico é muito influenciado pela quantidade de aditivo Sasobit[®] adicionado ao betume original, com visível redução da componente viscosa e significativo aumento da componente elástica dos betumes modificados.

Apesar dos valores máximos de $|G^*|$ dos betumes originais (B35/50, B50/70 e B100/150) serem distintos, verificou-se que a relação entre as suas componentes elástica (G') e viscosa (G'') é similar. Este comportamento, típico dos betumes convencionais, é altamente alterado para um comportamento mais elástico após modificação com Sasobit[®].

3.2.6. Comparação dos Resultados da Viscosidade Dinâmica Determinados no Viscosímetro Rotacional e no DSR

Uma das metodologias usadas no presente estudo para determinação da viscosidade dinâmica dos ligantes a diferentes temperaturas consistiu na sua avaliação com o viscosímetro rotacional. Este equipamento é relativamente simples, e não requer nenhum acessório de equipamento extremamente caro para a realização dos ensaios, tal como acontece no caso do DSR. Contudo, não foi encontrada na literatura existente nenhuma referência a este tipo de abordagem. Assim, tornou-se necessário avaliar se esta metodologia pode ou não ser utilizada no estudo da evolução da viscosidade com a temperatura.

Os resultados obtidos, em ambos os ensaios, para betume convencionais e modificados com Sasobit[®], foram relacionados entre si, tal como se apresenta na Figura 3.16.

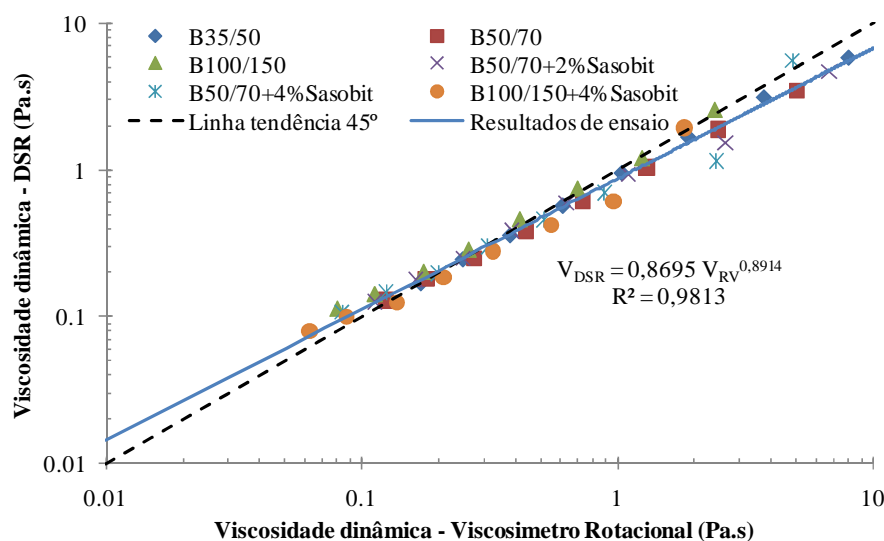


Figura 3.16 – Relação entre viscosidades medidas no viscosímetro rotacional e no DSR

Os pontos situados na linha a tracejado (tendência a 45°) contêm os resultados similares para ambos os tipos de ensaio. A linha a azul apresenta a lei que correlaciona os resultados obtidos nos ensaios, observando-se uma boa correlação entre a maioria dos pontos obtidos (muito próxima da linha de tendência a 45°), o que indica que a nova metodologia pode ser futuramente utilizada, sempre que o equipamento DSR não se encontrar disponível.

Todavia, para temperaturas abaixo dos 120 °C o viscosímetro rotacional apresenta viscosidades ligeiramente superiores ao DSR, sendo que o contrário acontece para temperaturas acima dos 160 °C.

3.3. Caracterização dos Agregados

3.3.1. Granulometria das Diversas Fracções de Agregados

Os agregados utilizados para a realização deste estudo foram criteriosamente seleccionados tendo como referência as especificações constantes do Caderno de Encargos (CE) tipo das Estradas de Portugal, de Março de 1998, que também foram utilizadas mais tarde para controlo de qualidade na execução do trecho experimental.

As cinco fracções de agregados e filer utilizadas neste trabalho são constituídas pelas seguintes dimensões nominais: 8/14 mm, 4/10 mm, areia 0/4 mm, pó 0/5 mm e filer comercial. A maior parte destas fracções de agregados é proveniente de uma pedreira que é propriedade de Manuel Rodrigues Gouveia, em Estombar – Portimão, à excepção do pó 0/5 mm que é de uma pedreira de calcários em Loulé, propriedade da Secil Britas. O filer comercial foi adquirido à empresa Eurocálcio de Fátima.

A análise granulométrica dos agregados foi feita com base na norma EN 933-1. No Quadro 3.2 e na Figura 3.17 apresentam-se os resultados dessa análise granulométrica.

A mistura de agregados a utilizar para a composição granulométrica final das misturas a estudar (AC14 Surf) será apresentada no Subcapítulo 3.4, referente ao estudo de formulação das misturas betuminosas, sendo obtida a partir da composição dos diversos agregados constituintes aqui apresentados, de forma a respeitar o fuso granulométrico preconizado no Caderno de Encargos em vigor para a mistura AC14 Surf.

Quadro 3.2 – Composição granulométrica das fracções de agregados

Peneiros Série base + Série 2	Agregado 8/14 (sienítica)	Agregado 4/10 (sienítica)	Areia Lavada 0/4 (calcário)	Pó 0/5 (calcário)	Filer Comercial (Eurocálcio)
40,0 mm	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
31,5 mm	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
20,0 mm	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
14,0 mm	83,1%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
10,0 mm	25,0%	87,2%	100,0%	100,0%	100,0%
4,0 mm	5,1%	0,5%	99,8%	98,4%	100,0%
2,0 mm	0,1%	0,4%	86,8%	72,3%	100,0%
0,500 mm	0,1%	0,3%	31,2%	27,3%	100,0%
0,125 mm	0,1%	0,2%	8,9%	13,3%	99,2%
0,063 mm	0,1%	0,2%	3,2%	10,6%	85,8%

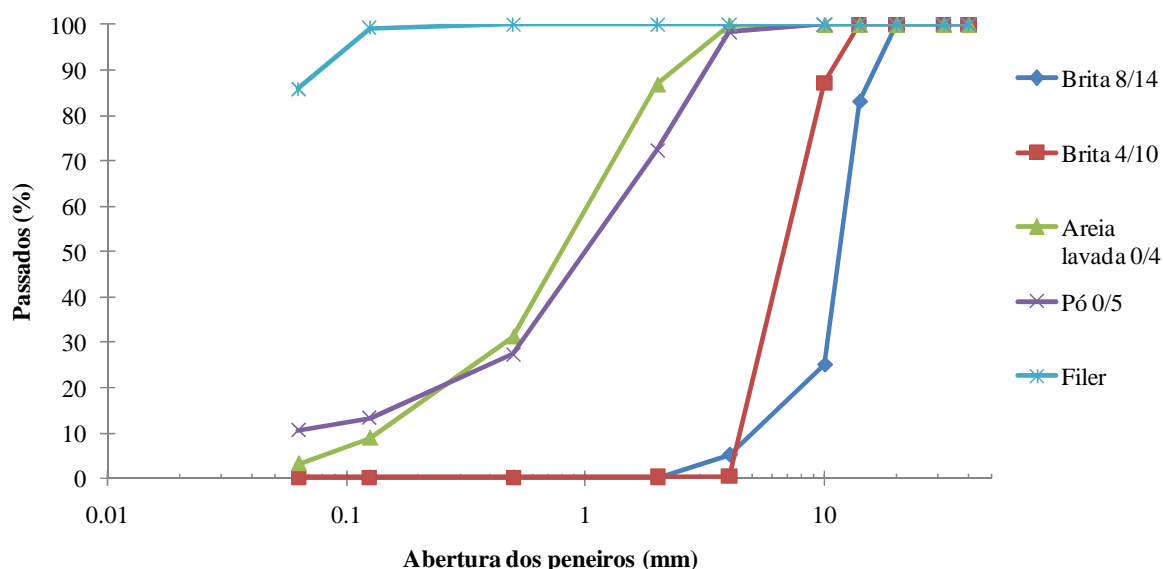


Figura 3.17 – Curva granulométrica dos agregados utilizados no presente estudo

3.3.2. Outras Características das Diversas Fracções de Agregados

Os agregados têm como principal função na estrutura do pavimento conferir resistência mecânica e flexibilidade à camada de desgaste. Para que os agregados desempenhem de forma adequada o seu papel, é fundamental que os mesmos tenham características granulométricas apropriadas, resistência mecânica e afinidade ao ligante betuminoso.

Para determinar a resistência mecânica dos agregados ao desgaste/fragmentação utiliza-se o ensaio de desgaste na máquina de Los Angeles (E-237), que consiste na colocação de uma

amostra de agregados, juntamente com 6 a 12 esferas de aço, num tambor que posteriormente é colocado em rotação, o que provoca o desgaste/fragmentação dos agregados. O material fragmentado é retirado do tambor após um determinado número de rotações. Como resultado do ensaio, obtém-se a percentagem de material que foi desgastado ou fragmentado (dimensão inferior a 2 mm) em relação à massa inicial da amostra

Quanto às formas das partículas, estas devem ser cúbicas e não lamelares, finas ou alongadas. O uso de quantidades excessivas de partículas lamelares e alongadas diminui a trabalhabilidade da mistura, dificultando a compactação e promovendo um maior consumo de betume, visto que estas partículas possuem uma superfície específica maior do que as partículas de forma cúbica. Um dos critérios para a quantificação da forma do agregado é pela avaliação dos índices de forma (índice de lamelação e de alongamento – BS 812), traduzidos pela percentagem em peso de partículas, respectivamente lamelares e alongadas. Para uma fracção granulométrica (d/D) designam-se partículas lamelares aquelas cuja espessura seja inferior a $0,6 \times (d+D)/2$ e partículas alongadas as de comprimento superior a $1,5 \times (d+D)/2$.

No que concerne à limpeza, os agregados devem ser limpos, ou seja, não devem possuir impurezas, tais como argilas e materiais orgânicos, dado que estas podem reduzir o atrito entre os grãos, possibilitando assim a ocorrência de variações volumétricas com a água ou, ainda, dificultando o envolvimento dos agregados pelo ligante. Para avaliar o grau de limpeza dos agregados finos pode utilizar-se o ensaio de equivalente de areia, que mede a quantidade relativa de partículas de argila num agregado fino (LNEC E-199). O ensaio de equivalente de areia consiste em preparar, numa proveta, uma solução aquosa com 120 g de agregados passados no peneiro nº 4, agitar esta mistura e deixá-la em suspensão e em repouso durante 20 minutos. Desta forma, o material grosseiro sedimenta mais rapidamente e o material mais fino fica em suspensão. Quanto maior o valor do EA, menor a quantidade de finos. Em número reduzido (EA elevado), estes não são prejudiciais para a mistura betuminosa.

De forma a conhecer a propriedade intrínseca do material, peso específico das partículas secas, para cada um dos agregados utilizados, bem como a quantidade de água absorvida pelos mesmos, utilizam-se os ensaios NP 591 e NP 581. No caso de se utilizar um agregado bastante poroso deve-se aplicar uma quantidade extra de betume para facilitar a trabalhabilidade da mistura.

As diversas características dos agregados, anteriormente referidas, foram determinadas para as diferentes fracções de agregados utilizados neste trabalho, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Características dos agregados utilizados

Características determinadas	Especificações seguidas	Agregado 8/14	Agregado 4/10	Areia Lavada 0/4	Pó 0/5	Filer
Desgaste de Los Angeles, Granulometria B (%), LNEC E 237	máx. 30%	27	---	---	---	---
Índice de lamelação (%), BS 812	máx. 25%	14	12	---	---	---
Índice de alongamento (%) BS 812	máx. 25%	25	14	---	---	---
Equivalente de areia (%) LNEC E 199	mín. 60%	---	---	83	73	---
Peso específico das partículas secas (g/cm ³) – NP 591	máx. 0,8	2,53	2,54	2,58	2,52	2,71
Absorção de água (%), NP 581	máx. 2%	1,0	1,0	1,0	1,9	---

De acordo com estes resultados, verifica-se que todas as propriedades cumprem os valores especificados para o tipo de mistura que se pretende produzir. No entanto, os valores de desgaste e do índice de alongamento da fracção 8/14 são relativamente elevados, o que pode originar um pior desempenho das misturas betuminosas.

3.3.3. Avaliação da Afinidade Agregado-Ligante

De forma a avaliar se os aditivos utilizados neste estudo para modificação do betume (Sasobit[®] e Cecabase[®]) poderão contribuir para o aumento da sensibilidade à água das misturas betuminosas produzidas, foi utilizado o procedimento indicado na norma europeia EN 12697-11 para determinação da afinidade entre os agregados e o betume.

Neste ensaio, e conforme preconizado na respectiva norma, utilizou-se a fracção de agregado 8/11 sienítico, juntamente com os seguintes tipos de ligantes:

- betume 50/70 convencional, a utilizar na mistura a quente;
- betume 50/70 aditivado com 4,0% de Sasobit[®], a utilizar numa mistura temperada;
- betume 50/70 aditivado com 0,3% de Cecabase[®], a utilizar noutra mistura temperada;
- betume 50/70 aditivado com um promotor de adesividade (Interlene[®]), que foi usado para avaliar se era possível melhorar a afinidade dos agregados ao ligante.

Pela análise dos resultados obtidos, verificou-se que a afinidade entre os agregados e os ligantes é significativamente afectada pelo tipo de agregado utilizado (agregado sienítico), tal como pode ser observado na Figura 3.18.

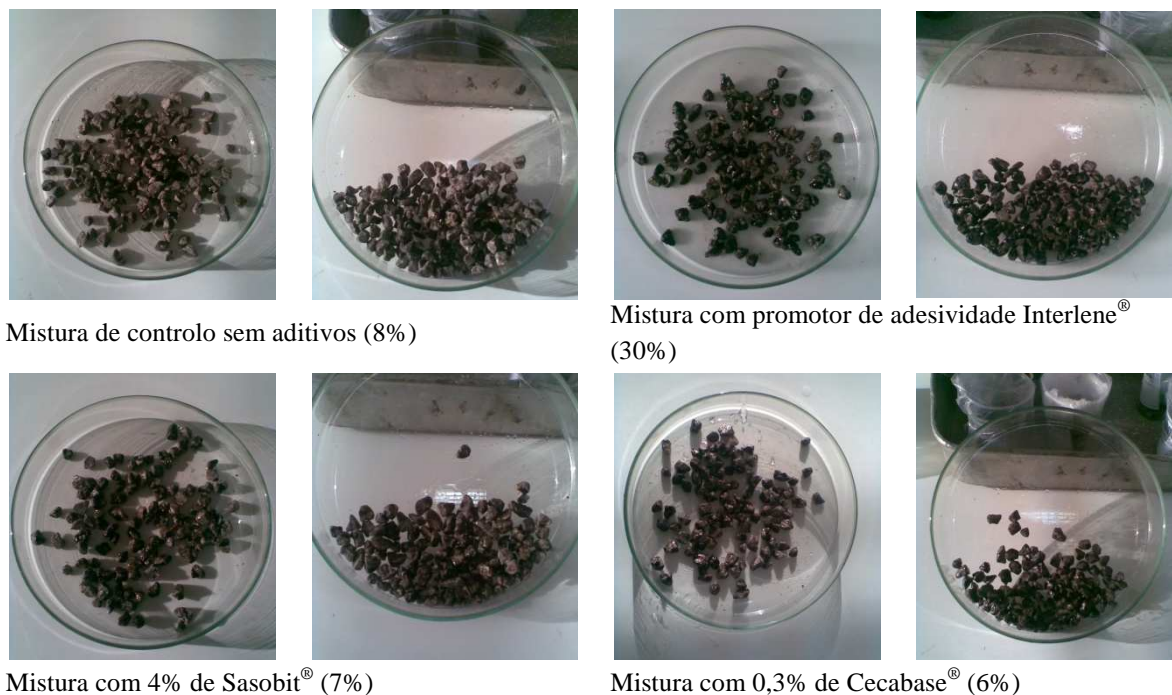


Figura 3.18 – Resultados dos ensaios da afinidade agregado-betume para os ligantes estudados

Na realidade, apenas 8% da superfície dos agregados estava coberta por ligante na mistura convencional produzida com betume 50/70. No caso dos ligantes modificados com os aditivos para a produção das misturas betuminosas temperadas, verificou-se que os resultados não foram significativamente alterados, face à mistura de controlo, sendo respectivamente 7 e 6% para os ligante com Sasobit® e Cecabase®. No caso do Interlene® verificou-se um incremento na superfície dos agregados coberta por ligante, num valor de cerca de 30%.

Concluiu-se, assim, que face aos ligantes convencionais, os betumes modificados com os aditivos estudados não apresentam problemas significativos de afinidade com o agregado.

Também, pela análise dos valores encontrados de afinidade betume-agregado, mesmo com a aditivção do ligante com um promotor desta característica, pode concluir-se que a eventual ocorrência duma maior sensibilidade à água (baixos valores de ITSR) das misturas em estudo resulta principalmente do tipo de agregado usado (e não da aditivção do ligante).

3.4. Formulação das Misturas Betuminosas

3.4.1. Introdução

No presente estudo foram estudadas três misturas betuminosas de forma a avaliar as características das MBT vs MBQ e a sua tecnologia de produção. Uma delas foi uma MBQ convencional (mistura de controlo) tipicamente utilizada na rede viária portuguesa (AC14 surf 50/70), enquanto as outras duas foram as “novas” MBT com a mesma composição mas utilizando diferentes tipos de aditivos comerciais, Sasobit® e Cecabase®.

Neste estudo, a percentagem de aditivo e as temperaturas de produção e de compactação foram as únicas variáveis em análise. Os outros parâmetros de composição (tipo de agregados, curva granulométrica, tipo e percentagem de ligante) foram idênticos nas três misturas estudadas. A porosidade também deveria ser constante. No entanto, este parâmetro volumétrico é muito dependente da temperatura de produção, sendo um parâmetro utilizado para seleccionar ou validar a temperatura óptima de produção das MBT em central.

Considerando as premissas anteriores, a formulação da mistura (selecção dos materiais constituintes, agregados sieníticos e betume, curva granulométrica e percentagem de ligante), foi somente determinada sobre a mistura betuminosa a quente, sendo os resultados finais obtidos considerados para todas as misturas estudadas.

O presente estudo de formulação foi baseado no actual acervo normativo para definir o betão betuminoso. De acordo com o estipulado nas Normas Europeias, o objectivo final deve ser especificar o betão betuminoso em termos de propriedades fundamentais baseadas no desempenho. No entanto, dadas as diferenças de conhecimento e de experiência no espaço comunitário europeu relativamente às especificações baseadas numa abordagem fundamental para este tipo de mistura betuminosa, em Portugal optou-se por formular estas misturas através de uma abordagem empírica.

Esta abordagem define o betão betuminoso em termos de parâmetros de composição e requisitos para os materiais constituintes, combinados com requisitos adicionais baseados em ensaios relacionados com o desempenho (pr NP EN 13108-1).

Seguindo esta filosofia, as misturas betuminosas deste estudo serão classificadas de acordo com as propriedades gerais e empíricas, tais como a composição granulométrica, volume de vazios (entre outras propriedades de composição, tais como os vazios na mistura de agregado e a percentagem de ligante), estabilidade e deformação Marshall, resistência à deformação permanente (ensaio de pista), índice de resistência conservada em tracção indirecta (ITSR) e a temperatura de fabrico das misturas.

Posteriormente (Subcapítulo 3.6), depois de determinada a composição final das diversas misturas em estudo, será realizada uma análise comparativa das suas propriedades fundamentais baseadas no desempenho, tais como o módulo de rigidez e a vida à fadiga.

3.4.2. Formulação da Mistura Betuminosa de Referência

Actualmente, depois de efectuar o estudo da composição granulométrica a utilizar na mistura betuminosa, é recomendado que a formulação em laboratório (determinação da percentagem óptima em betume) das misturas betuminosas incluídas no âmbito da norma pr NP EN 13108-1 – Betão betuminoso), que serviu de base a este estudo, seja efectuada com base no método Marshall (EN 12697-34).

Em seguida, a optimização da percentagem de betume encontrada através do método de Marshall deve ser complementada com ensaios de pista (EN 12697-22, para determinação da resistência das misturas à deformação permanente), com ensaios de sensibilidade à água (EN 12697-12, para determinação do índice de resistência conservada em tracção indirecta) e com ensaios para determinação do índice de resistência conservada (Norma Militar Americana MIL-STD-620A e Cahier RILEM 17 BM/no. 3). Esta metodologia, descrita no anexo nacional da norma prNP EN 13108-1 foi a seguida no presente estudo para formulação da mistura betuminosa convencional a quente.

3.4.3. Características Base da Mistura Betuminosa Formulada

A formulação da mistura MBQ em estudo (AC14 surf 50/70) foi feita com base no fuso granulométrico especificado no anexo nacional da norma prNP EN 13108-1. Variando as percentagens em que cada agregado é utilizado na mistura (Quadro 3.4) foi possível obter a curva granulométrica que cumpre o referido fuso (Figura 3.19).

Quadro 3.4 – Percentagem de cada fracção de agregados utilizados na mistura betuminosa

Fracção de agregados	Agregado 8/14	Agregado 4/10	Areia Lavada 0/4	Pó 0/5	Filer
Percentagem utilizada na mistura de agregados para a mistura betuminosa	37%	21%	12%	28%	2%

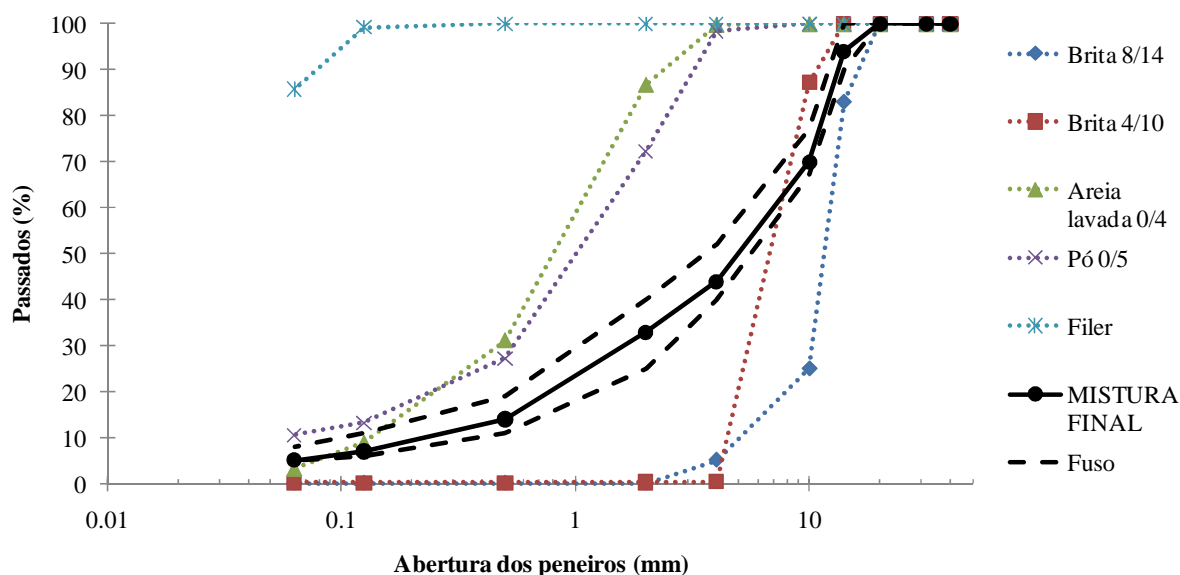


Figura 3.19 – Curva granulométrica da mistura de agregados do AC14 Surf e fuso granulométrico adoptado

Com a composição granulométrica apresentada na Figura 3.19, e de acordo com o preconizado pelo método Marshall, foram moldados provetes de acordo com a norma EN 12697-30 (preparação de provetes pelo compactador de impacto), com uma energia de compactação de 75 pancadas em cada extremo do provete. Foram realizados três provetes por percentagem estudada, avaliando-se cinco percentagens distintas de betume próximas do valor óptimo expectável.

Sobre cada provete foi determinada a densidade aparente pelo método hidrostático de acordo com a norma EN 12697-6 (determinação da baridade aparente de provetes de mistura betuminosa, método B). Também foi determinada a baridade máxima teórica da mistura pela norma EN 12697-5 (determinação da baridade máxima teórica de misturas betuminosas pelo método volumétrico).

Conhecendo estas duas grandezas, assim como a percentagem de betume utilizado na preparação de cada provete, determinaram-se diversas propriedades volumétricas da mistura

betuminosa pela norma EN 12697-8 (determinação das propriedades volumétricas de provetes de mistura betuminosa), tais como o volume de vazios ou porosidade, vazios na mistura de agregados e vazios preenchidos com betume.

Depois de obtidas as características volumétricas dos provetes, estes foram ensaiados a uma temperatura de 60 °C e com uma velocidade de deformação de 50 mm/min, de acordo com o método Marshall apresentado na norma EN12697-34. Desta forma, foram determinados os valores da estabilidade e deformação Marshall para cada provete ensaiado.

No Quadro 3.5 apresentam-se os resultados obtidos para as características volumétricas e para os valores da estabilidade e deformação Marshall da mistura em estudo, assim como os valores especificados no caderno de encargos para cada propriedade.

Quadro 3.5 – Resumo das características volumétricas e de estabilidade da mistura

Propriedade avaliada	Valores especificados	Percentagem de ligante				
		4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Baridade máxima teórica (Kg/m ³)	---	2488	2482	2471	2453	2439
Baridade dos provetes (Kg/m ³)	---	2350	2370	2380	2390	2380
Porosidade (%)	3 a 5	5,5	4,4	3,5	2,7	2,5
V.M.A. (%)	mín. 14	14,6	14,8	15,1	15,5	16,4
V.F.B. (%)	---	62,6	70,2	76,6	82,4	84,7
Estabilidade (N)	8000 a 15000	13487	14823	14333	13290	12803
Deformação (mm)	máx. 4	2,30	2,62	3,53	3,79	4,31

A percentagem de betume óptima a seleccionar resulta da média dos valores das percentagens de betume que conduzem ao valor máximo da baridade da mistura betuminosa compactada, ao valor médio dos limites da especificação para a percentagem de vazios, e ao valor máximo correspondente à estabilidade Marshall. A análise dos resultados indicou que o valor óptimo da percentagem de ligante determinado pelo método Marshall era igual a 5%, valor para o qual todas as especificações do caderno de encargos são cumpridas.

3.4.4. Características da Mistura Betuminosa Obtidas no Estudo Complementar

Complementarmente à formulação Marshall, de acordo com o anexo nacional na norma prNP EN 13108-1, executou-se um estudo adicional que consistiu na realização de ensaios de sensibilidade à água (ITSR), resistência à deformação permanente (WTS_{AIR}) e resistência

conservada, sobre misturas betuminosas preparadas com três percentagens de ligante diferentes (uma delas com a percentagem óptima determinada anteriormente, e as restantes com uma variação de $\pm 0,5\%$). Os valores obtidos são os constantes no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Resultados dos ensaios complementares para formulação da mistura

Propriedade avaliada	Percentagem de ligante		
	4,5	5,0	5,5
Ensaio de pista – WTS_{AIR} (mm/10 ³)	0,06	0,08	0,09
Sensibilidade à água – ITSR (%)	39,9	47,0	41,9
Resistência conservada (%)	69,0	74,0	73,0
Volume de vazios (%)	4,4	3,5	2,7

Pela análise dos resultados obtidos em termos de resistência à deformação permanente e de sensibilidade à água, constata-se que com a percentagem de ligante óptima inicialmente obtida (5,0%) se obtém uma mistura betuminosa mais “equilibrada” (que não atinge valores mínimos de WTS_{AIR} e ITSR), confirmando desta forma a valor óptimo determinado pelo método Marshall.

3.5. Optimização da Temperatura de Fabrico das Misturas Betuminosas Temperadas

Da análise efectuada no Subcapítulo 3.2. (selecção, produção e caracterização do ligante) concluiu-se que se consegue uma redução máxima de temperatura de produção da mistura ao utilizar 4% de Sasobit[®], enquanto a adição de até 0,4% de Cecabase[®] não altera a viscosidade do ligante. Assim, a quantidade de Sasobit[®] seleccionada para continuação do estudo foi 4%. Como os resultados da caracterização do ligante com Cecabase[®] foram inconclusivos, optou-se por utilizar a percentagem de 0,3% com base nas indicações do produtor.

Para definição e optimização das temperaturas de produção das misturas betuminosas temperadas (com Sasobit[®] e Cecabase[®]), após a análise dos resultados obtidos na caracterização do ligante, considerou-se necessário validar as temperaturas de fabrico com base em parâmetros volumétricos obtidos para misturas produzidas a diferentes temperaturas, utilizando para esse fim o ensaio compactabilidade com compactador de impacto, de acordo com a norma EN 12697-10.

3.5.1. Ensaio de Compactabilidade com Diferentes Provetes para Cada Energia de Compactação

Dado que o objectivo principal era otimizar a temperatura de produção (para a quantidade de aditivo seleccionada) para as misturas betuminosas temperadas, foi estudada a variação da compactabilidade (características volumétricas) das misturas betuminosas temperadas (MBT) alterando a temperatura e comparando o volume de vazios com o que era obtido para a mesma mistura fabricada a quente (MBQ). A composição utilizada, bem com a percentagem de ligante das três misturas, foi a encontrada no Subcapítulo 3.4 (formulação).

Para a realização deste ensaio foram moldados diferentes provetes com diferentes energias de compactação pelo compactador de impacto, sobre os quais se determinou a baridade da mistura e o volume de vazios. As temperaturas usadas para produção das misturas, assim como os resultados volumétricos obtidos para as misturas betuminosas convencionais a quente (MBQ) e temperadas (MBT com Sasobit® e com Cecabase®), são as apresentadas na Figura 3.20.

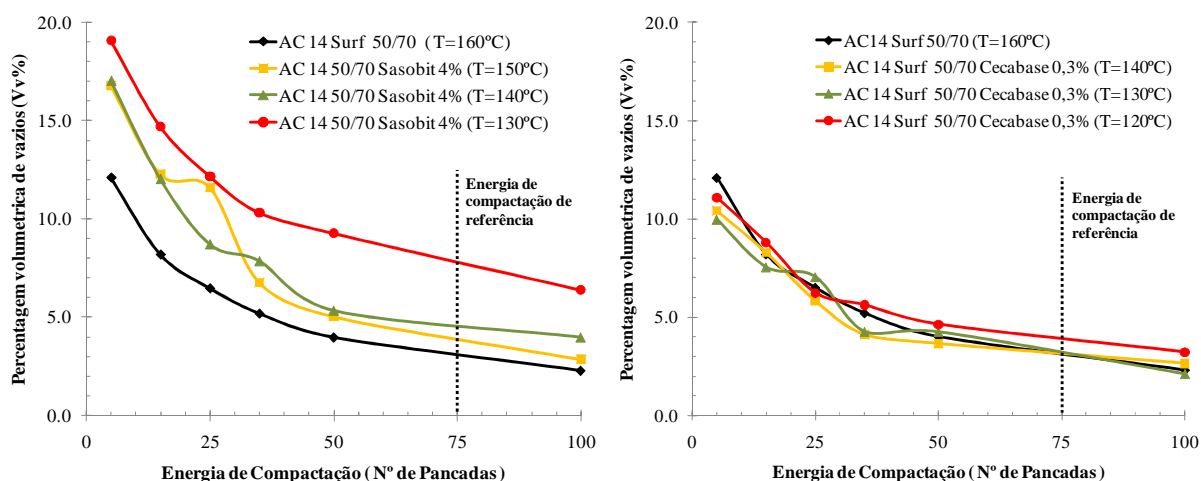


Figura 3.20 – Resultados da compactabilidade a diferentes temperaturas e com diferentes provetes (Sasobit® na esquerda e Cecabase® na direita)

De acordo com a caracterização da viscosidade efectuada sobre o betume modificado com o Sasobit® (Subcapítulo 3.2), observou-se que era possível conseguir uma redução da temperatura de fabrico de 10 °C. No entanto, e pela análise dos resultados obtidos no ensaio de compactabilidade, verificou-se que era possível reduzir a temperatura de fabrico para os

140 °C, dado que mesmo para esta temperatura o volume de vazios da mistura na linha da energia de compactação de referência – 75 pancadas em cada extremo do provete – ainda se encontra dentro dos limites estabelecidos para a mistura convencional. A comparação entre a porosidade da mistura betuminosa a quente e das MBT produzidas com Cecabase[®], e compactadas a diferentes temperaturas, permitiu concluir que é possível reduzir a temperatura de produção desta mistura MBT até aos 120 °C, sem variação significativa da compactabilidade da mistura.

De acordo com o procedimento apresentado na norma EN 12697-10, é possível determinar a resistência à compactação da cada mistura com base nos resultados obtidos neste ensaio e apresentados na Figura 3.20. No entanto, dado que se observou alguma dispersão nos resultados obtidos quando se prepararam diferentes provetes para cada energia de compactação, considerou-se que seria conveniente determinar a variação do volume de vazios utilizando o mesmo provete para as diferentes energias de compactação (o que é possível controlando a altura do provete durante a compactação com um LVDT).

3.5.2. Ensaio de Compactabilidade com o Mesmo Proвете para Diferentes Energias de Compactação

De acordo com a norma EN 12697-10, é possível avaliar a compactabilidade das misturas betuminosas utilizando o compactador de impacto, registando a variação da espessura de cada provete (três por cada mistura/temperatura estudada) com um LVDT durante a operação de compactação, em função do número de pancadas correspondente.

As temperaturas usadas para fabrico das misturas neste novo método de ensaio, assim como os resultados volumétricos obtidos para as misturas betuminosas convencionais a quente (MBQ) e temperadas (MBT com Sasobit[®] e com Cecabase[®]), quando se utiliza o mesmo provete para as diferentes energias de compactação, são os apresentados na Figura 3.21.

Os resultados obtidos confirmam as reduções de temperatura que já tinham sido definidas anteriormente, ou seja, a mistura betuminosa temperada com Sasobit[®] pode ser fabricada, sem problemas volumétricos, a temperaturas superiores a 140 °C, enquanto a mistura com Cecabase[®] pode ser produzida a temperaturas mais baixas (mas neste caso será conveniente utilizar temperaturas iguais ou superiores a 130 °C).

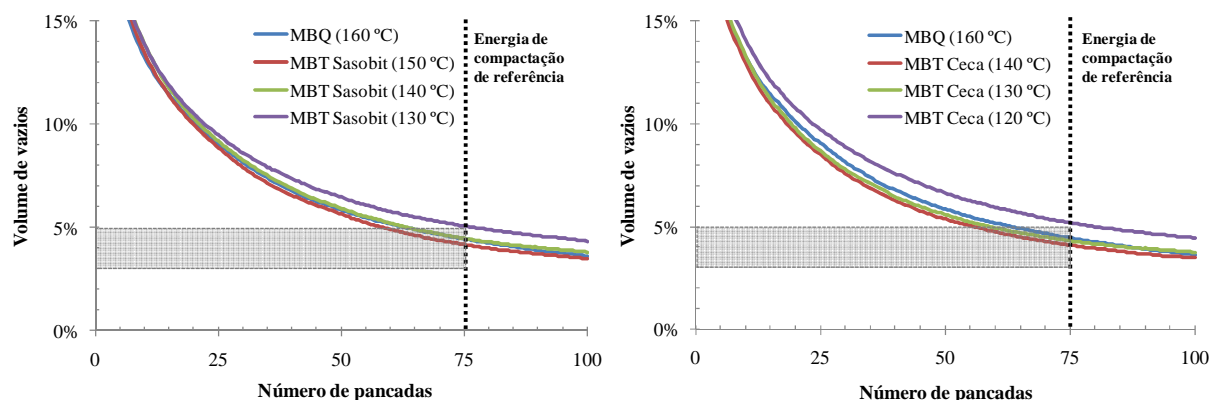


Figura 3.21 – Resultados da compactabilidade a diferentes temperaturas e com o mesmo provete (Sasobit® na esquerda e Cecabase® na direita)

Entretanto, a resistência à compactação foi calculada de acordo com o procedimento descrito na norma EN 12697-10 (Equação 1), e os resultados obtidos são apresentados no Quadro 3.7.

$$\frac{1}{t(E_2)} = \frac{1}{t_\infty} - \left[\frac{1}{t_\infty} - \frac{1}{t_0} \right] \exp\left(\frac{-E_2}{T}\right) \quad (3.1)$$

Onde:

$t(E_2)$ espessura do provete para a energia de compactação E_2 utilizando o compactador de impacto (mm);

t_∞ espessura mínima possível estimada do provete no compactador de impacto (mm);

t_0 espessura inicial estimada do provete no compactador de impacto (mm);

E_2 energia de compactação (compactador de impacto), expressa na unidade 21 Nm, cujo valor numérico é igual ao número de pancadas no provete;

T resistência à compactação (compactação de impacto, método com o mesmo provete para todos os níveis de energia de compactação), expressa na unidade 21 Nm.

Quadro 3.7 – Resistência à compactação (EN 12697-10) obtida a diferentes temperaturas

Mistura	MBQ	MBT Sasobit [®]				MBT Cecabase [®]		
Temperatura de produção (°C)	160	150	140	130	140	130	120	
Volume de vazios às 75×2 pancadas	4,4%	4,2%	4,5%	5,1%	4,1%	4,3%	5,2%	
Resistência à compactação T (21 Nm)	33,9	31,2	31,8	33,5	30,9	31,3	33,2	
Espessura mínima t _∞ (mm)	64,2	63,6	64,3	64,4	64,3	64,6	65,5	
Espessura inicial t ₀ (mm)	81,6	82,4	83,2	82,3	82,1	83,0	83,4	

Mais uma vez, comprova-se que as temperaturas seleccionadas para fabrico das misturas betuminosas temperadas com Sasobit® (140 °C) e com Cecabase® (120 a 130 °C) são adequadas para continuação do trabalho. De facto, verifica-se que a resistência à compactação destas misturas só aumenta de forma mais significativa quando se utilizam temperaturas inferiores às referidas.

Também foi interessante constatar que, tal como esperado, houve um aumento da resistência à compactação quando se reduziram as temperaturas de fabrico das misturas. Por outro lado, verificou-se que a resistência à compactação da mistura betuminosa a quente é superior à obtida para as misturas betuminosas temperadas (mesmo fabricadas a menores temperaturas), o que pode significar que os aditivos alteram a forma como a estrutura interna da mistura resiste aos esforços de compactação.

3.6. Caracterização Laboratorial das Misturas Betuminosas Temperadas

Conforme referido nos capítulos anteriores, o presente estudo visa a avaliação comparativa do desempenho mecânico de três misturas idênticas na sua constituição (cuja composição foi determinada no Subcapítulo 3.4), variando a temperatura de produção das mesmas. Uma das misturas é produzida a quente (MBQ), numa gama de temperatura de 150-170 °C, e as outras duas são misturas betuminosas temperadas (MBT) produzidas à custa da introdução dos dois aditivos (Sasobit® e Cecabase®), numa gama de temperaturas de produção de 120-140 °C.

Estipuladas que foram as temperaturas de produção das misturas betuminosas temperadas, bem como a quantidade de aditivo a utilizar na sua composição, iniciou-se o estudo laboratorial para determinação das suas propriedades volumétricas e de desempenho (gerais e fundamentais). As propriedades avaliadas foram a sensibilidade à água (e a resistência conservada), a resistência à deformação permanente, o módulo de rigidez (realizado a temperaturas entre 10 e 30 °C) e a resistência ao fendilhamento por fadiga.

3.6.1. Análise de Composição e Volumétrica

Nesta fase do estudo foram produzidas diversas amassaduras de modo a produzir lajes e provetes de ensaio para cada tipo de mistura em estudo. Alguns provetes (ensaio de pista e de

flexão em 4 pontos) foram compactados com um cilindro de rasto liso (Figura 3.22). Os restantes provetes (sensibilidade à água) foram obtidos com um compactador de impacto.



Figura 3.22 – Compactação das misturas no molde com cilindro de rasto liso

Depois de extraídos os provetes, e antes de serem ensaiados, foi feita a sua caracterização volumétrica (baridade máxima teórica, baridade aparente e porosidade). A BMT das misturas betuminosas foi determinada conforme o procedimento A da norma EN 12697-5. A baridade aparente foi determinada em todos os provetes conforme a norma EN 12697-6, parte B. Após determinação de todas as características físicas de composição, foram calculados os parâmetros volumétricos (EN 12697-8) de cada provete moldado por compactação de impacto, conforme EN 12697-30, para as três misturas betuminosas em estudo, cujos valores médios são apresentados no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Características das misturas resultantes do estudo laboratorial

Propriedade avaliada	Norma de ensaio	MBQ 50/70	MBT 50/70 Sasobit®	MBT 50/70 Cecabase®
Percentagem de betume (%)	EN 12697-1	5,0	5,0	5,0
Baridade máxima teórica (kg/m ³)	EN 12697-5	2420	2409	2401
Volume de vazios (%)	EN 12697-8	3,0	3,5	3,0

Conforme se pode analisar pelo Quadro anterior, as características volumétricas das misturas betuminosas temperadas são análogas à da mistura betuminosa a quente, o que permite concluir que a metodologia usada, bem como as temperaturas e quantidades de aditivos seleccionadas, foram adequadas. De facto, apenas se verificou uma ligeira redução da baridade máxima teórica (devido à utilização dos aditivos), e um ligeiro aumento do volume de vazios (0,5%) da mistura MBT com Sasobit®.

3.6.2. Estudo da Sensibilidade à Água

A sensibilidade à água é uma propriedade determinada pela norma EN 12697-12, com um método idêntico ao que já era aplicado em Portugal para determinar a resistência conservada através da norma MIL-STD-602A, adequando-se a quase todas as misturas especificadas na família de normas EN 13108.

O ensaio consiste na preparação de 6 provetes (neste caso moldados por compactação de impacto), que são caracterizados volumetricamente e em seguida são divididos em dois grupos, um dos quais é imerso em água e outro não. No final deste procedimento são ensaiados todos os provetes para se determinar o índice de tracção indirecta (ITSR – *Indirect Tensile Strength Ratio*), que é a razão entre a resistência à tracção indirecta média do grupo de provetes acondicionados em água (ITS_w) e do grupo de provetes secos (ITS_d). Os ensaios de tracção indirecta (Figura 3.23) são realizados conforme indicado na norma EN 12697-23.

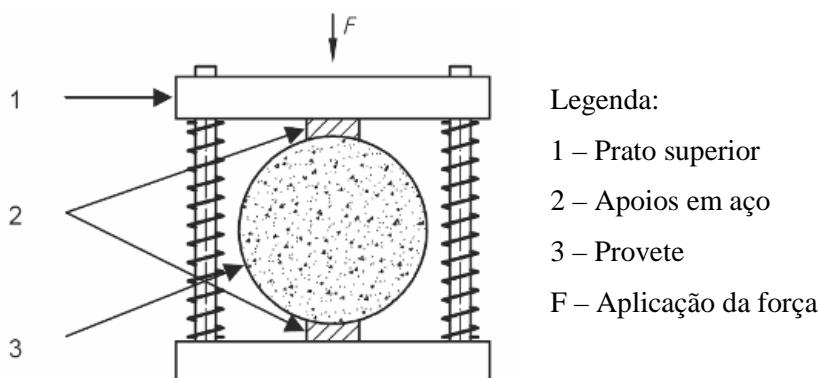


Figura 3.23 – Esquema do ensaio para determinação da resistência à tracção indirecta

Neste trabalho, a sensibilidade à água das misturas betuminosas em estudo foi determinada através do procedimento acima referido, assim como através da norma MIL-STD-620A (resistência conservada – único valor especificado até ao momento em Portugal), obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 3.9.

Quadro 3.9 – Sensibilidade à água das misturas estudadas em laboratório

Propriedade avaliada	Norma de ensaio	MBQ 50/70	MBT 50/70 Sasobit®	MBT 50/70 Cecabase®
ITSR (%)	EN 12697-12	47	42	52
Resistência Conservada (%)	MIL-STD-620A	74	70	77

Pela análise dos valores do ITSR, foi possível concluir que os valores obtidos são inferiores ao que seria de esperar para o tipo de mistura em estudo. A justificação para estes valores reduzidos de resistência à acção da água já foi apresentada aquando do estudo da afinidade betume-agregado, ou seja, resulta das propriedades dos agregados que foi obrigatório utilizar neste trabalho.

Relativamente à comparação entre a MBQ e as misturas MBT, verifica-se que o Sasobit[®] reduz um pouco o valor do ITSR, enquanto o Cecabase[®] aumenta ligeiramente esse valor. No entanto, de uma forma global não há uma grande alteração da sensibilidade à água, pelo que se pode afirmar que o desempenho das três misturas é semelhante.

3.6.3. Resistência à Deformação Permanente

O ensaio de resistência à deformação permanente permite avaliar a susceptibilidade à deformação dos materiais betuminosos. Consiste na medição da profundidade de rodeira formada após sucessivas passagens de uma roda sobre o provete em condições de temperatura mais elevadas. Este ensaio é realizado conforme estipulado na norma EN 12697-22 e é vulgarmente denominado como ensaio de pista (*Wheel Tracking Test*) devido ao equipamento usado no ensaio (Figura 3.24).



Figura 3.24 – Ensaio de pista para determinação da resistência à deformação permanente

Neste ensaio, existem seis tipos de procedimentos possíveis de serem realizados, função do tamanho do equipamento e do acondicionamento dos provetes. O ensaio pode ser executado em equipamento grande, extra-grande e pequeno, com acondicionamentos ao ar ou em água. O procedimento adoptado é o mais usual – procedimento B – e é realizado com recurso ao equipamento pequeno e acondicionamento ao ar.

Para execução do ensaio por este procedimento são necessários apenas 2 provetes, e são aplicados 10 000 ciclos de carga, sendo que o ensaio será dado como concluído após este número de ciclos, ou quando atinja a profundidade de rodeira de 20 mm. No caso de amostras acondicionadas em ar, os principais resultados obtidos no ensaio de pista são a média da variação da deformação permanente ao ar – *Wheel Tracking Slope in air* (WTS_{AIR}) e a média proporcional da profundidade da rodeira nos dois provetes ensaiados – *Mean Proportional Rut Depth in air* (PRD_{AIR}). A variação da deformação permanente em ar é expressa pela Equação 3.2, onde d_{5000} e d_{10000} , em mm, correspondem à profundidade de rodeira, respectivamente após 5000 e 10000 ciclos.

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (3.2)$$

Para realização deste ensaio foram produzidas lajes com as dimensões 30×30×4 cm³, conforme especifica a norma de ensaio EN 12697-22, e cuja espessura é função da dimensão dos agregados utilizados na mistura. A temperatura de ensaio utilizada de 60 °C foi fixada com base no anexo nacional da norma prNP EN 13108-1. Nestas condições foram obtidos os resultados apresentados no Quadro 3.10.

Quadro 3.10 – Resistência à deformação permanente das misturas no ensaio de pista

Propriedade avaliada	Norma de ensaio	MBQ 50/70	MBT 50/70 Sasobit®	MBT 50/70 Cecabase®
WTS_{AIR} (mm/10 ³)	EN 12697-22	0,08	0,10	0,11
PRD_{AIR} (mm)	EN 12697-22	2,7	2,1	2,6

Através da análise dos resultados obtidos para a deformação permanente pode concluir-se que as MBT deformaram-se ligeiramente mais do que a mistura MBQ. Relativamente à percentagem máxima de profundidade da rodeira, os resultados obtidos são contrários (as misturas MBT têm melhor desempenho do que a MBQ), o que permite concluir que ambas as MBT têm um desempenho semelhante à MBQ no que diz respeito à resistência à deformação permanente (embora o Sasobit® tenha um desempenho um pouco superior ao Cecabase®).

3.6.4. Módulo de Rigidez

Este ensaio está classificado como de desempenho base, ou seja, os seus resultados têm relação directa com as propriedades de desempenho de uma mistura betuminosa em serviço.

Durante o ensaio aplica-se uma força sinusoidal à mistura betuminosa compactada, para determinado valor de temperatura, frequência e amplitude (esta última controlada em termos de deslocamento, sendo necessário garantir que se está no regime linear existente para pequenas extensões). Deste ensaio resulta a obtenção do módulo complexo e do ângulo de fase da mistura.

A norma EN 12697-26 define oito tipos de ensaios para determinar a rigidez (que diferem na forma dos provetes, nos equipamentos e na configuração de carga). Para o ensaio com viga prismática apoiada em quatro pontos (4PB-PR) (Figura 3.25), que foi utilizado neste trabalho, a norma EN 13108-20 estabelece a temperatura de 20 °C e a frequência de 8 Hz (embora se utilize habitualmente o valor de 10 Hz) para determinar o módulo de rigidez.

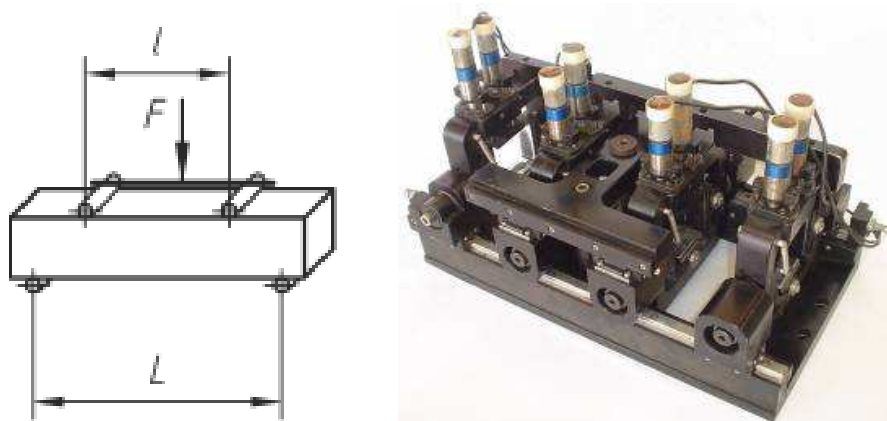


Figura 3.25 – Esquema e foto do dispositivo para o ensaio de flexão em quatro pontos em provetes prismáticos (4PB-PR)

O método que aplica flexão a uma viga apoiada em quatro pontos tem sido o mais usado no nosso país, pelo que é abordado com mais pormenor. As vigas para ensaio são montadas num dispositivo (Figura 3.25) composto por duas amarras externas (as reacções) e duas amarras internas (as acções). Estas amarras, além de terem a função de amarrar o provete, têm a particularidade de terem liberdade de movimento de rotação e de translação horizontal para não originarem tensões adicionais no provete.

Este dispositivo deve estar inserido numa câmara climática e acoplado a um sistema servo hidráulico (Figura 3.26) que permita a aplicação de uma carga cíclica sinusoidal às duas amarras internas, e devidamente equipado com um sistema de aquisição automático dos diversos parâmetros de ensaio (força, deslocamento e temperatura, entre outros).



Figura 3.26 – Máquina para realização dos ensaios de módulo de rigidez e de fadiga em quatro pontos

O módulo de rigidez de uma mistura betuminosa depende principalmente da temperatura e do tempo de carga, que por sua vez se relacionam com as condições climáticas e com a velocidade do tráfego. O módulo de rigidez das misturas estudadas foi obtido no ensaio 4PB-PR, em quatro provetes com $5,1 \times 6,3 \times 38,0 \text{ cm}^3$, como indicado na norma EN 12697-26.

Neste trabalho foram usadas as frequências de 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 8 e 10 Hz, seguida novamente de 0,1 Hz (EN 12697-26). No estudo do módulo de rigidez das misturas betuminosas utilizou-se a temperatura de 20 °C indicada na norma EN 13108-20, que também é uma temperatura de projecto representativa de diversos locais em Portugal.

Assim, os ensaios para determinação da rigidez das misturas betuminosas em estudo conduziram aos resultados médios apresentados nas Figuras 3.27 e 3.28, respectivamente para o módulo de rigidez e para o ângulo de fase a diversas frequências e a 20 °C.

Verifica-se que a evolução do módulo com a frequência é semelhante para as três misturas estudadas, com as misturas temperadas a apresentarem módulos mais elevados do que a mistura MBQ, principalmente a MBT com Sasobit® (o que seria de esperar devido à elevada rigidez das ceras sintéticas adicionadas à mistura nesta temperatura de ensaio).

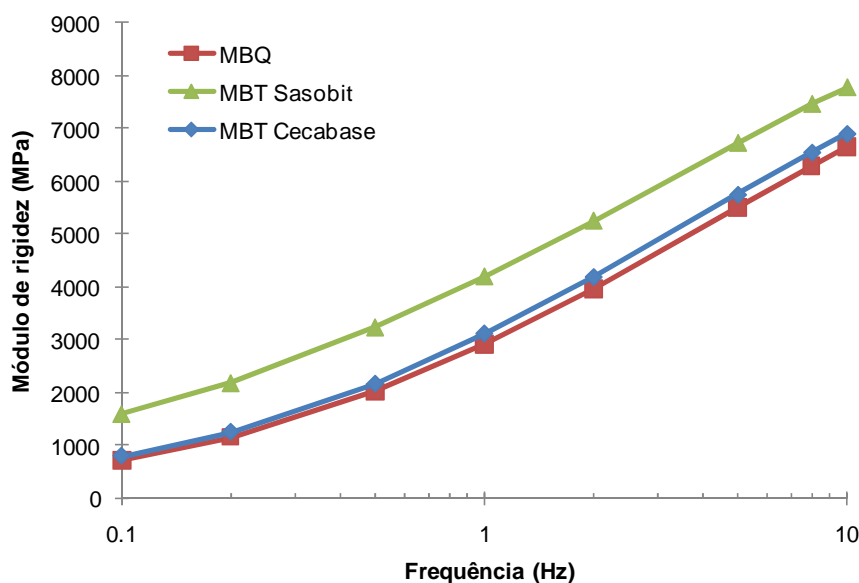


Figura 3.27 – Variação do módulo de rigidez com a frequência para as misturas estudadas

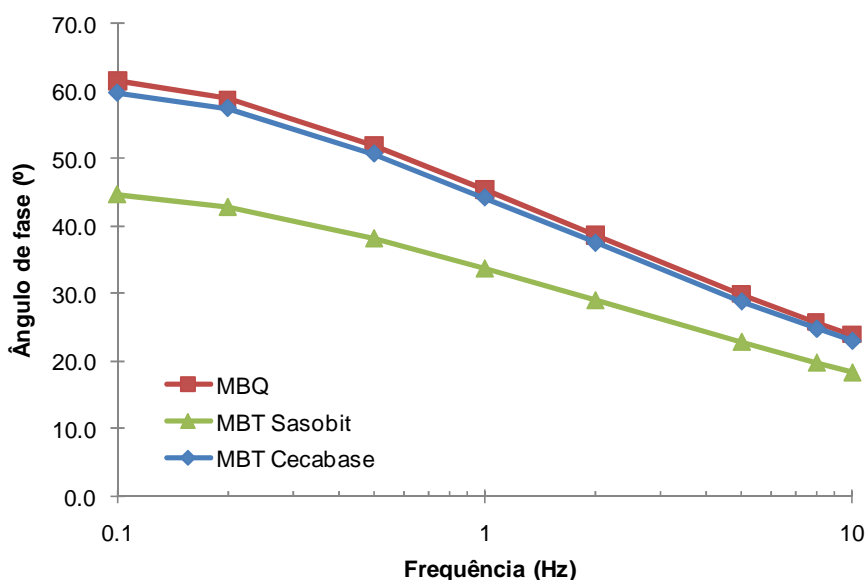


Figura 3.28 – Variação do ângulo de fase com a frequência para as três misturas estudadas

Pelo mesmo motivo, a mistura MBT com Sasobit® apresenta ângulos de fase bastante inferiores às restantes misturas (principalmente para frequências mais baixas), o que significa que tem um comportamento mais elástico (ou menos viscoso) a estas temperaturas.

Os valores do módulo de rigidez obtidos a uma temperatura de 20 °C e à frequência de 10 Hz (a mais utilizada em Portugal) foram 6600 MPa para a mistura MBQ, 7800 MPa para a mistura MBT com Sasobit® e 6900 MPa para a mistura MBT com Cecabase® (valores estes habituais, embora ligeiramente elevados, para este tipo de misturas betuminosas). Em resumo,

o desempenho das misturas betuminosas temperadas estudadas, em relação à sua rigidez, é igual ou superior ao de uma mistura MBQ com a mesma composição. Este é um ponto favorável para as MBT estudadas, pois pode permitir reduzir a quantidade de material a aplicar no pavimento para o mesmo nível de tráfego.

3.6.5. Resistência ao Fendilhamento por Fadiga

O ensaio de fadiga é o último da série de ensaios indicados pelos requisitos fundamentais da norma prNP EN 13108-1 para classificar as misturas betuminosas. Nesta norma são atribuídas categorias de resistência à fadiga às misturas em função da extensão máxima que a mistura suporta em cada ciclo de carga para atingir a rotura por fadiga ao fim de 1E6 ciclos, determinado de acordo com a EN 12697-24.

Para o ensaio de fadiga em quatro pontos (4PB-PR), a norma estabelece que o ensaio seja feito à temperatura de 20 °C e a uma frequência de 30 Hz (foi usada uma frequência de 10 Hz devido à elevada experiência na realização de ensaios a 10 Hz e à falta de referências de ensaios realizados a 30 Hz.). Os ensaios de fadiga são executados em misturas betuminosas compactadas, onde é aplicada uma carga sinusoidal até se atingir a rotura por fadiga do provete de mistura betuminosa, sendo possível usar diferentes tipos de provetes e equipamentos (em função do tipo de ensaio a realizar).

No ensaio, em geral, determina-se o número de ciclos de aplicação de carga até que o provete atinja a rotura mediante um critério previamente estipulado, que no ensaio em controlo de deslocamento é a redução do módulo de rigidez para metade do seu valor inicial, tal como se apresenta no esquema da Figura 3.29.

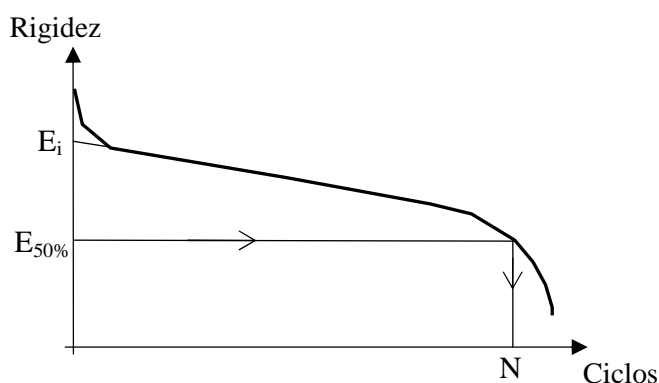


Figura 3.29 – Definição da rotura em ensaios de flexão em 4 pontos com extensão controlada

Tal como foi referido no ensaio de para determinação do módulo de rigidez, o ensaio de fadiga também pode ser efectuado com vários métodos diferentes. O método de flexão a uma viga apoiada em quatro pontos foi o utilizado neste trabalho, sendo que a sua execução já foi explicada anteriormente (Subcapítulo 3.6.4).

Seguindo o critério de rotura em controlo de deslocamento, regista-se a força inicial ao ciclo 100, prosseguindo o ensaio até que este valor se reduza para metade. No caso de o ensaio ser realizado em controlo de deslocamento, devem ser definidos três níveis de extensão que garantam que a rotura por fadiga dos provetes ocorra sempre entre os 10^4 e 2×10^6 ciclos, e devem ser ensaiadas três a seis vigas em cada nível de extensão.

A lei de fadiga da mistura betuminosa (Equação 3.3), a partir da qual se vai obter a classificação do nível de extensão para um milhão de ciclos de carga, é definida pelo ajuste duma função de potência aos resultados dos ensaios de fadiga realizados, num gráfico em escala logarítmica que nas abcissas apresenta o nível de extensão e nas ordenadas o respectivo número de ciclos de carga que originou a rotura por fadiga.

$$N = a \times \left(\frac{1}{\varepsilon_0} \right)^b \quad (3.3)$$

Sendo:

N = resistência à fadiga da mistura betuminosa;

ε_0 = extensão de tracção;

a, b = coeficientes determinados experimentalmente.

A partir dos resultados dos ensaios de fadiga para cada viga foi possível determinar a lei de fadiga de cada mistura, de acordo com a Equação 3.3, cujos gráficos são apresentados na Figura 3.30 para as três misturas betuminosas em estudo.

As misturas MBT e a mistura convencional MBQ têm uma vida à fadiga muito semelhante, tal como se pode verificar pela “quase” sobreposição das várias leis de fadiga para as misturas estudadas. No entanto, a resistência à fadiga da mistura MBQ é ligeiramente superior à das misturas MBT, e a mistura com Sasobit[®] é a que tem melhor desempenho neste segundo grupo.

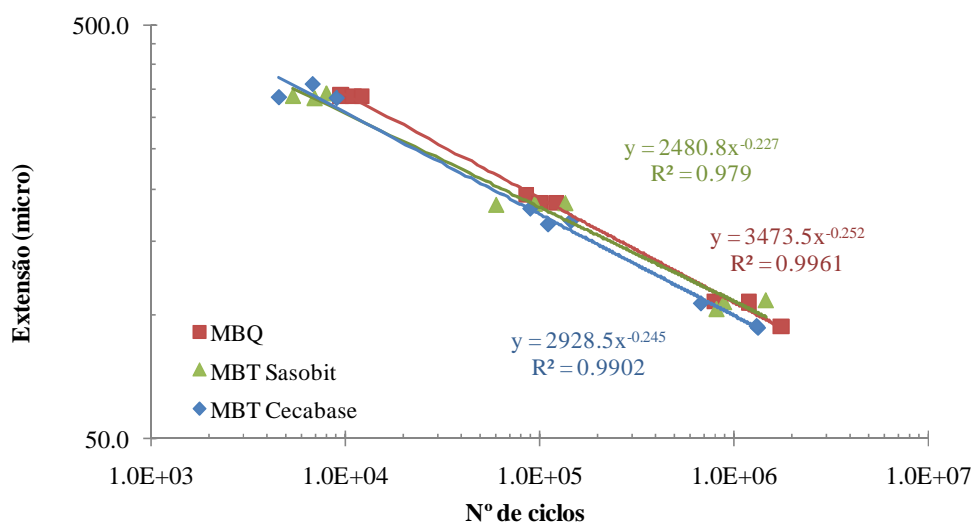


Figura 3.30 – Leis de fadiga obtidas em laboratório para as misturas betuminosas em estudo

Ao analisar a resistência à fadiga em função da extensão aplicada, verifica-se que a MBT com Sasobit® tem uma variação diferente das restantes misturas, apresentando um pior desempenho para extensões elevadas (superiores a 250E-6), embora tenha um bom desempenho para menores extensões (tipicamente observadas nos pavimentos em serviço). Isto ocorre, eventualmente, devido a uma ligeira fragilização do betume devido à incorporação das ceras.

Ao contrário do referido por alguns autores, que têm concluído que devido ao menor envelhecimento resultante da redução da temperatura de fabrico, as misturas MBT têm uma maior resistência à fadiga, no caso do presente estudo tal não sucedeu, mantendo um desempenho equivalente à MBQ. Os valores de ϵ_6 (resistência à fadiga) obtidos a uma temperatura de 20 °C e a 10 Hz foram 107E-6 para a mistura MBQ, 108E-6 para a mistura MBT com Sasobit® e 99E-6 para a mistura MBT com Cecabase® (os diversos valores são reduzidos, o que deve resultar dos agregados utilizados).

Em resumo, o desempenho das diferentes misturas relativamente à fadiga é muito semelhante, não sendo comprometido pela utilização dos aditivos, nem pela redução de temperatura.

3.6.6. Conclusão

Em resumo, as características das MBT são análogas às da MBQ, o que permite concluir que a metodologia usada durante a caracterização laboratorial, bem como a composição das

misturas e as temperaturas e quantidades de aditivos seleccionadas para a produção das MBT foram adequadas.

Desta forma, depois de avaliado e validado o desempenho das diferentes misturas betuminosas em laboratório, concluiu-se que estavam reunidas as condições para se proceder à seguinte fase experimental do trabalho, consistindo esta na validação na produção (na central de fabrico de misturas betuminosas) e na execução de um trecho experimental para avaliação estrutural e funcional do comportamento das diversas misturas betuminosas *in situ*, o que será descrito no Capítulo seguinte.

4. VALIDAÇÃO NA PRODUÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS EM TRECHO EXPERIMENTAL

4.1. Considerações Preliminares ao Fabrico das Misturas

Confirmados que foram os pressupostos impostos pelo Dono de Obra para as misturas produzidas, através da validação em laboratório, foi executada a componente deste trabalho relativa à produção das misturas betuminosas temperadas em central e seu espalhamento e compactação num trecho experimental.

A central de produção utilizada foi uma Intrame RM 260, descontínua, com uma capacidade de produção instalada de 260 toneladas por hora, cujos tanques eram desprovidos de agitadores, imprescindíveis para uma mais adequada homogeneização do ligante com os aditivos utilizados nas misturas temperadas.

Após inspeção organoléptica, verificou-se uma maior dificuldade de manuseamento e dispersão do aditivo Sasobit[®] (Figura 4.1), face à utilização do aditivo líquido Cecabase[®] RT 945 (Figura 4.2). A mistura de ambos os aditivos (Sasobit[®] e Cecabase[®]) com o ligante deu-se a uma temperatura de 150 °C.



Figura 4.1 – Forma de acondicionamento e aspecto visual do Sasobit[®]



Figura 4.2 – Forma de acondicionamento e aspecto visual do Cecabase[®] RT 945

Desta forma, os ligantes, após aditivados na cisterna de abastecimento, foram descarregados nos tanques de abastecimento de uma outra central equipada com este tipo de dispositivos. Foi necessário recorrer à utilização de uma cisterna de transporte (Figura 4.3) para transportar os ligantes aditivados entre os dois locais.



Figura 4.3 – Mistura do aditivo na cisterna de transporte

O trecho experimental realizou-se na região do Algarve, junto à cidade de Portimão, na obra do Autódromo Internacional do Algarve, e numa extensão de cerca de 1600 metros. Devido aos condicionalismos construtivos associados à inauguração desta obra emblemática, foi necessário produzir este tipo de misturas no Inverno, pelo que o trecho experimental foi realizado durante o mês de Dezembro, com temperaturas usualmente inferiores às desejáveis para as operações de aplicação de misturas betuminosas.

A semana anterior à realização do trecho experimental foi muito chuvosa, pelo que os agregados para a realização das misturas não se encontravam completamente secos. Considerou-se este cenário possível para uma produção normal das misturas betuminosas temperadas, e assim sendo o trecho foi executado como planeado. Desta forma, também foi possível aferir se este tipo de tecnologia pode ser usado em condições menos favoráveis, como aquelas que ocorreram nesta obra.

Nos dois dias de execução do trecho, a temperatura do ar estava um pouco acima dos 10 °C no início dos trabalhos da manhã, e aumentou ligeiramente ao longo do dia. Dada a proximidade

da central de produção das misturas betuminosas (Figura 4.4) ao trecho experimental, o tempo de transporte não se mostrou relevante para reduzir a temperatura das misturas antes da sua aplicação e compactação.



Figura 4.4 – Aspecto da central de fabrico das misturas

4.2. Produção das Misturas Betuminosas

Devido a restrições técnicas (relacionadas com a entrega dos ligantes modificados), as misturas temperadas não puderam ser produzidas todas no mesmo dia. Por conseguinte, a mistura betuminosa convencional e a produzida com o aditivo Sasobit[®] foram produzidas e aplicadas no primeiro dia, enquanto a mistura com o Cecabase[®] foi apenas produzida no dia seguinte.

A mistura convencional foi produzida a 165 °C, sendo que os agregados que estavam extremamente molhados necessitaram de ser aquecidos a 175 °C. De salientar que a central iniciou neste dia a produção com esta mistura, tendo existido algumas dificuldades na regulação do queimador da central.

Dado o betume base (betume de penetração 50/70) ter sido o mesmo para todas as misturas, a redução da temperatura não pôde ser tão significativa para a MBT com Sasobit[®], uma vez que este aditivo actua como redutor de viscosidade acima dos 120 °C. Logo, considerou-se uma temperatura de 140 °C para esta mistura.

Tal como foi explicado anteriormente, o aditivo Cecabase[®] não tem qualquer efeito sobre a viscosidade do ligante, e desse modo foi utilizado uma maior redução da temperatura da produção, sendo que esta mistura betuminosa temperada foi produzida a 125 °C.

De referir que na produção destas MBT a redução final da temperatura das misturas foi obtida à custa de um abaixamento da temperatura dos agregados, sendo que a temperatura do ligante aditivado se manteve a 155 °C. De facto, e devido a desconhecimento técnico, as primeiras cargas de MBT com Sasobit[®] foram produzidas com o ligante a cerca de 140 °C, o que originou uma mistura mal envolvida e que teve que ser imediatamente rejeitada.

Relativamente ao tempo de mistura necessário para a produção das misturas betuminosas, aumentou-se em cerca de 10% o tempo de amassadura, de 32 segundos da mistura convencional para 35 segundos para as misturas betuminosas temperadas, de forma a garantir um correcto envolvimento dos agregados nas misturas.

Na produção das misturas foi ainda controlado, de uma forma aproximada, o consumo de fuel gasto no aquecimento dos agregados. Assim, pode observar-se que este foi de 6,0 kg/Ton na MBQ, sendo de 4,5 kg/Ton na mistura MBT produzida com o Sasobit[®] e de 4,0 kg/Ton na mistura MBT com Cecabase[®].

A central de produção estava equipada de um pirómetro óptico de medição em contínuo da temperatura de produção das misturas betuminosas, instalado junto à zona de descarga para o “skip”. Na Figura 4.5 apresentam-se as temperaturas medidas para as três misturas em estudo.

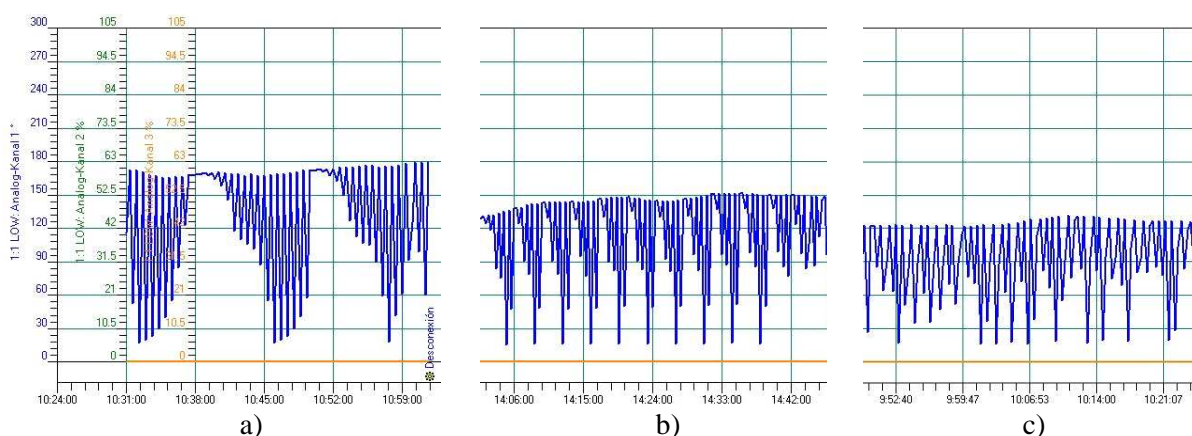


Figura 4.5 – Registo das temperaturas obtido directamente do equipamento da central de produção: a) mistura convencional; b) mistura com Sasobit[®]; c) mistura com Cecabase[®]

Duas das vantagens da utilização das misturas betuminosas temperadas, comparativamente com as misturas betuminosas a quente, usualmente referenciadas na literatura, são as melhores condições de trabalho para as equipas de pavimentação, dadas as temperaturas mais baixas a que os operadores estão sujeitos, assim como a menor exposição aos fumos libertados durante a produção e aplicação destas misturas. Neste trecho experimental, ambas as situações puderam ser observadas, sendo a redução de fumos durante a produção em central claramente visível na Figura 4.6.



Figura 4.6 – Fumos observados na descarga das misturas betuminosas para o camião na central de produção: a) mistura convencional; b) MBT

Na fotografia do lado esquerdo são visíveis os fumos libertados aquando da descarga da mistura convencional para o camião, o que já não acontece com a mistura betuminosa temperada, tal como se pode verificar na fotografia do lado direito. Os trabalhadores que aplicaram a mistura no trecho também referiram que as condições de trabalho eram melhores.

4.3. Método Construtivo Utilizado no Trecho Experimental

Conforme referido anteriormente, a central de produção das misturas betuminosas estava praticamente contígua com o local de aplicação, razão pela qual, apesar da temperatura atmosférica rondar os 15 °C, não existiu uma redução significativa entre a temperatura de produção e a da aplicação/compactação.

A estrutura do pavimento do trecho experimental é constituída por uma base em agregado britado de granulometria extensa com 0,20 m de espessura, sobre a qual foi colocada uma

mistura betuminosa de base (AC20 base 50/70 MB), com 0,07 m de espessura, e finalmente uma camada de desgaste com cada uma das três misturas betuminosas em estudo, numa espessura de 0,05 m.

O perfil longitudinal era variável, existindo maioritariamente zonas com um reduzido declive (quase horizontais), a contrastar com outras zonas mais pontuais com um declive mais acentuado. Em planta, o trecho é composto por um conjunto de alinhamentos rectos de dimensão reduzida, concordados por curvas com raios, por vezes, um pouco reduzidos.

Ao serem utilizados os equipamentos de espalhamento e compactação habituais em obra (Figura 4.7), a nível das restantes misturas betuminosas, validou-se não só a mistura betuminosa a quente como as misturas betuminosas temperadas. Assim, foi considerada a mesma metodologia de aplicação e compactação para as três misturas, que consistia no espalhamento com uma pavimentadora Vogelle 2000, e a compactação recorrendo a um cilindro de rasto liso Hamm HD90 e a um de pneus GRW18.



Figura 4.7 – Equipamento utilizado na construção do trecho experimental: a) aplicação das misturas betuminosas; b) compactação

A metodologia adoptada permitiu a execução de uma espessura constante e de acordo com o preconizado no projecto, conforme foi possível confirmar pelos carotes executados, e cujos resultados (valores médios de 12 carotes executados em cada mistura aplicada) são apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Características das carotes retiradas em obra

Tipo de Mistura	Norma de ensaio	MBQ 50/70	MBT 50/70 Sasobit®	MBT 50/70 Cecabase®
Espessura (cm)	EN 12697-1	5,1	5,0	5,1
Volume de vazios (%)	EN 12697-8	5,0	4,4	4,0
Grau de compactação – Em relação à baridade aparente (%)	EN 12697-6	97,4	97,1	97,7

Da análise efectuada podemos concluir que as três misturas em estudo apresentam em obra idênticas características volumétricas e de grau de compactação, nas temperaturas de compactação utilizadas. Assim, confirma-se que a redução de temperatura nas misturas betuminosas temperadas não reduziu a sua compactabilidade em obra, tal como já se tinha verificado em laboratório.

Como seria de esperar, foi dada uma atenção particularmente importante ao controlo da temperatura de compactação das misturas betuminosas (Figura 4.8), e que veio a confirmar os resultados desejáveis para este parâmetro.



Figura 4.8 – Temperaturas aproximadas a que foram compactadas as misturas betuminosas temperadas: a) com Sasobit®; b) com Cecabase®

Conforme expectável pela validação em laboratório, o processo de compactação da mistura betuminosa a quente deu-se numa gama de temperaturas entre 145 e 160 °C, sendo que as misturas betuminosas temperadas com Sasobit® e Cecabase® foram compactadas, respectivamente, a temperaturas de 120 a 135 °C e de 100 a 125 °C.

4.4. Características Finais das Misturas Betuminosas Aplicadas no Trecho

Neste trabalho, era fundamental validar em obra os resultados obtidos em laboratório, nomeadamente ao nível das características volumétricas e do desempenho final no trecho experimental das três misturas aplicadas.

Assim, para cada mistura betuminosa aplicada em obra, e de acordo com o preconizado na norma EN 12697-27 (amostragem), para além da colheita de amostras para a confirmação da granulometria (que se verificou estar enquadrada dentro do fuso), também se verificou a percentagem de betume, a baridade máxima teórica e características volumétricas dos provetes compactados pelo compactador de impacto à temperatura de compactação da obra.

Relativamente às propriedades relacionadas com o desempenho, avaliou-se a sensibilidade à água e a resistência conservada, e foram retiradas lajes para obtenção de provetes de modo a verificar a resistência à deformação permanente, o módulo de rigidez e a vida à fadiga das misturas compactadas no trecho. Dado que se verificou a ocorrência de problemas relacionados com contaminação com fuel (no queimador), também se estudou este problema, nomeadamente através de ensaios ao ligante recuperado das misturas.

4.4.1. Análise de Composição e Volumétrica

Após determinação de todas as características físicas de composição, foram calculados os parâmetros volumétricos (EN 12697-8) e a percentagem de betume de cada provete moldados por compactador de impacto (EN 12697-30), para as três misturas betuminosas aplicadas no trecho experimental, cujos valores médios são apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Características das misturas aplicadas no trecho experimental

Tipo de Mistura	Norma de ensaio	MBQ 50/70	MBT 50/70 Sasobit®	MBT 50/70 Cecabase®
Percentagem de Betume (%)	EN 12697-1	5,0	5,1	5,3
Baridade máxima teórica (kg/m ³)	EN 12697-5	2418	2414	2407
Volume de vazios (%)	EN 12697-8	2,7	2,0	2,0

Após análise dos resultados apresentados, pode ser estabelecido que a percentagem de ligante é similar para as três misturas em estudo, apesar da mistura betuminosa com Cecabase® apresentar um valor ligeiramente superior. Adicionalmente, determinou-se a distribuição granulométrica dos agregados recuperados das misturas, cujos resultados obtidos permitiram confirmar a curva dentro do fuso preconizado.

As características volumétricas das misturas betuminosas temperadas (volume de vazios) são análogas às da mistura betuminosa a quente, o que permite concluir que a metodologia usada (temperaturas e quantidades de aditivos) também garante uma compactabilidade adequada *in situ* (ou ainda melhor do que na MBQ). No entanto, convém referir que o volume de vazios das MBTs é consideravelmente, o que pode originar alguns problemas de estabilidade.

4.4.2. Estudo da Sensibilidade à Água

A sensibilidade à água das misturas betuminosas aplicadas no trecho experimental foi determinada através da norma EN 12697-12, assim como através da norma MIL-STD-620A (resistência conservada), obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Sensibilidade à água das misturas aplicadas no trecho experimental

Tipo de Mistura	Norma de ensaio	MBQ 50/70	MBT 50/70 Sasobit®	MBT 50/70 Cecabase®
ITSR (%)	EN 12697-12	85,8	85,2	67,0
Resistência Conservada (%)	MIL-STD-620A	106,0	103,0	85,3

Em termos de índice de resistência conservada em tracção indirecta (ITSR) e resistência conservada, os resultados em obra demonstraram uma melhoria de desempenho que pode estar relacionada com o melhor envolvimento dos agregados pelo ligante (o que poderá ter resultado de uma possível contaminação com fuel), juntamente com a baixa porosidade das misturas em comparação com a obtida em laboratório.

Também foi possível verificar que o desempenho das misturas betuminosas temperadas se mantém semelhante ao da MBQ nesta propriedade, embora a mistura MBT com Cecabase® tenha demonstrado ter uma sensibilidade à água um pouco mais elevada.

4.4.3. Resistência à Deformação Permanente

Conforme relatado, foram retiradas lajes dos três sub-trechos para determinação da resistência à deformação permanente. Os ensaios de pista foram realizados nas mesmas condições apresentadas no Subcapítulo 3.6.3, mas agora sobre provetes retirados do trecho experimental. Assim, os resultados obtidos foram os apresentados no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Valores da resistência à deformação permanente de lajes retiradas do pavimento

Tipo de Mistura	Norma de ensaio	MBQ 50/70	MBT 50/70 Sasobit®	MBT 50/70 Cecabase®
Volume de vazios da laje (%)	EN 12697-8	2,4	2,1	3,4
WTS _{AIR} (mm/10 ³)	EN12697-22	0,25	0,69	0,29

Verificou-se que a resistência à deformação permanente das misturas MBT é inferior à observada na mistura MBQ, principalmente para a mistura com Sasobit®. Comparando estes resultados com os obtidos no estudo de laboratório (Figura 4.9), é possível verificar que os valores de resistência à deformação permanente das misturas aplicadas no trecho são aproximadamente metade dos obtidos em laboratório (para todas as misturas). Esta situação alertou para um eventual problema que se procurou avaliar de forma mais aprofundada.

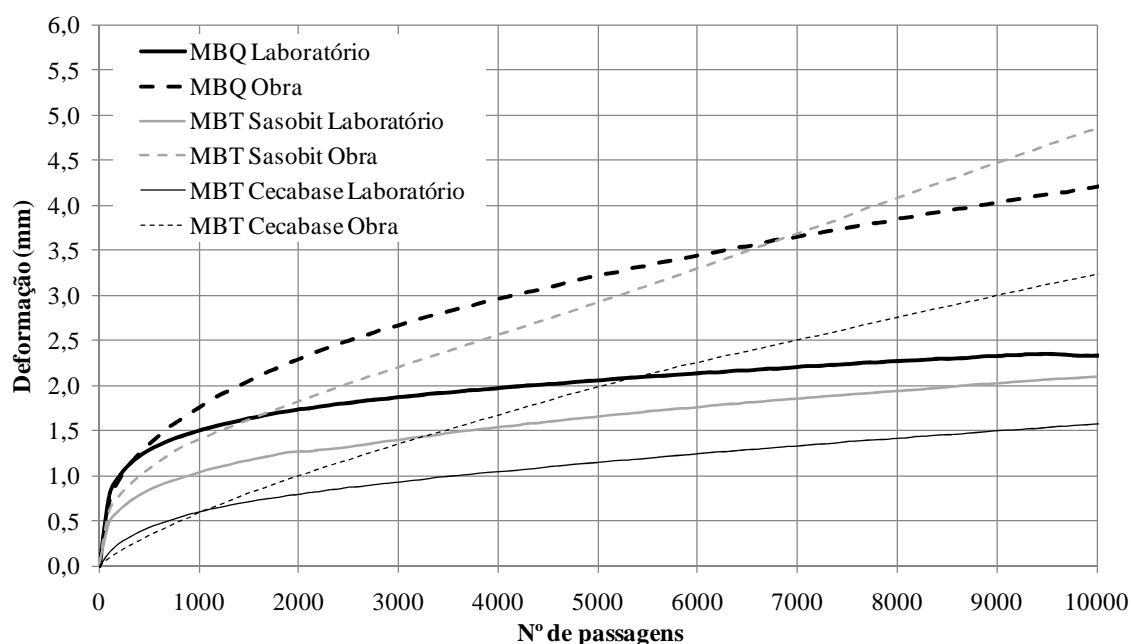


Figura 4.9 – Valores da resistência à deformação permanente de lajes produzidas em laboratório e retiradas após aplicação em obra

Vários autores retrataram a susceptibilidade das misturas betuminosas temperadas à contaminação com fuel. Torna-se difícil ajustar os queimadores com baixas temperaturas de produção combinadas com baixas produções, nomeadamente em trechos experimentais (Prowell and Hurley, 2008). Ainda de acordo com os mesmos autores, isto pode ser explicado por uma necessidade de um pré-aquecimento do fuel antes da produção de forma a remover eventuais condensações que possam provocar contaminação das misturas durante o aquecimento dos agregados.

No caso do trecho experimental realizado, para além de não ter sido executado o pré-aquecimento do fuel, devido a desconhecimento técnico, os agregados estavam muito molhados, o que, no entender do autor, originou de facto a contaminação com fuel.

4.4.4. Análise do Problema de Contaminação com Fuel

De forma a confirmar esta teoria, e uma vez que tinham sido recolhidas em obra amostras dos ligantes em quantidade suficiente, ainda antes da produção das misturas para o trecho experimental (à saída da cisterna de abastecimento), foram mais uma vez produzidas em laboratório lajes para o ensaio de pista, com composição granulométrica análoga à utilizado no trecho experimental. Estas lajes visavam verificar os valores da resistência à deformação permanente determinados nas lajes retiradas do trecho experimental (caso os resultados sejam melhores do que os do trecho, significa que o problema não foi causado pelo ligante, confirmando a justificação apresentada anteriormente). Os resultados obtidos com estas “novas” lajes são os apresentados no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Valores da resistência à deformação permanente (lajes moldadas em laboratório com betume recolhido em obra)

Tipo de Mistura	Norma de ensaio	MBQ 50/70	MBT 50/70 Sasobit®	MBT 50/70 Cecabase®
Volume de vazios (%)	EN 12697-8	3,2	3,1	2,8
WTS _{AIR} (mm/10 ³)	EN12697-22	0,10	0,12	0,14

Os resultados obtidos permitiram confirmar os valores da validação em laboratório, afastando a possibilidade de ter ocorrido algum problema na mistura do aditivo com o betume, e confirmando a contaminação com fuel das misturas produzidas no trecho experimental.

4.4.5. Módulo de Rigidez

Conforme descrito anteriormente, também foram determinadas as características de desempenho relacionadas com a rigidez das misturas (EN 12697-26). Os ensaios para determinação do módulo de rigidez (ensaios de flexão em 4 pontos) foram realizados nas mesmas condições apresentadas no Subcapítulo 3.6.4, mas agora sobre provetes retirados do trecho experimental.

Assim, os ensaios para determinação da rigidez das misturas betuminosas aplicadas no trecho conduziram aos resultados médios apresentados nas Figuras 4.10 e 4.11, respectivamente para o módulo de rigidez e para o ângulo de fase a diversas frequências e a 20 °C.

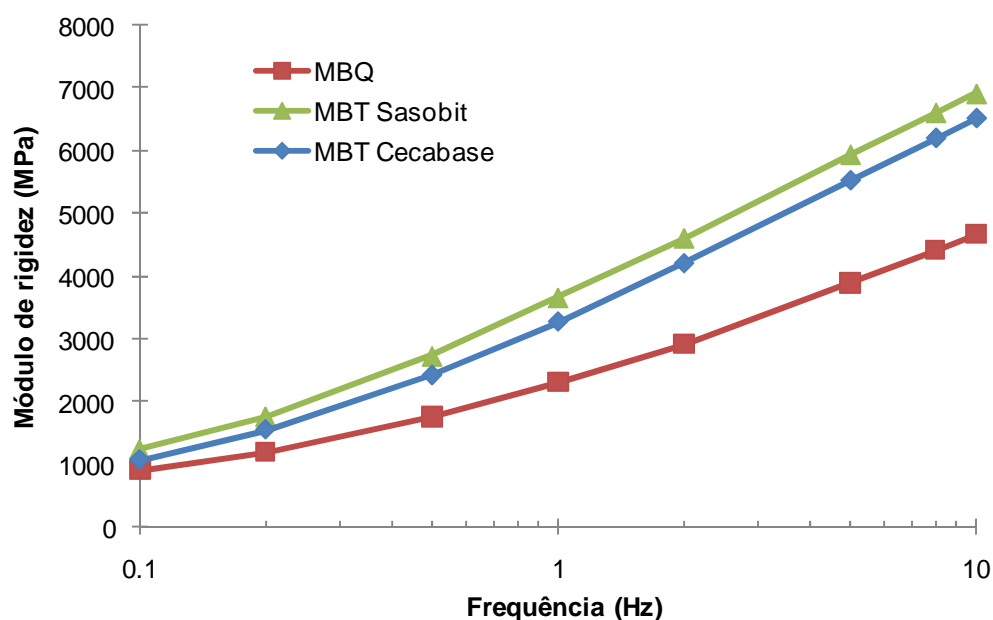


Figura 4.10 – Variação do módulo de rigidez com a frequência para as três misturas aplicadas no trecho experimental

Os valores do módulo de rigidez obtidos a uma temperatura de 20 °C e à frequência de 10 Hz (a mais utilizada em Portugal) foram 4700 MPa para a mistura MBQ, 6900 MPa para a mistura MBT com Sasobit® e 6500 MPa para a mistura MBT com Cecabase®. Estes valores são claramente inferiores aos obtidos em laboratório, o que mais uma vez confirma a tese de que as misturas aplicadas no trecho foram contaminadas com fuel. A mistura MBQ foi a que teve maior redução de módulo de laboratório para o trecho.

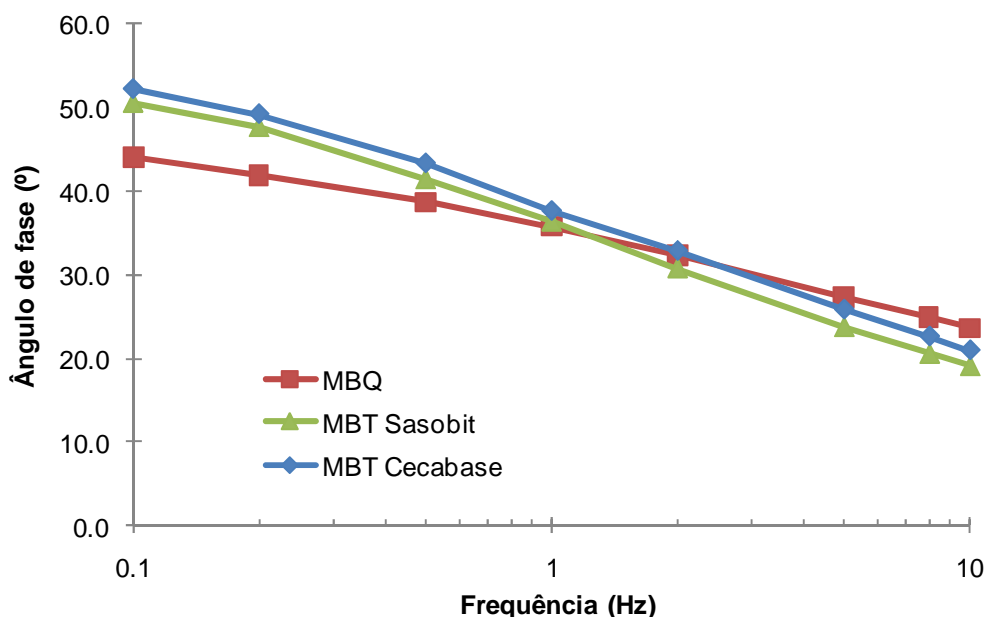


Figura 4.11 – Variação do ângulo de fase com a frequência para as três misturas aplicadas no trecho experimental

Verifica-se que a evolução do módulo com a frequência é semelhante para as duas misturas temperadas (que continuam a apresentar módulos mais elevados do que a mistura MBQ), sendo diferente para a mistura MBQ.

A evolução do ângulo de fase com a frequência também é diferente para a mistura MBQ em comparação com as MBT. A mistura MBQ tem um comportamento menos viscoso a baixas frequências, mas também tem um comportamento menos elástico a frequências elevadas.

Após análise dos resultados foi possível concluir que apesar do problema de contaminação, as misturas MBT continuam a superar a mistura MBQ convencional no que diz respeito ao módulo de rigidez, o que confirma que é possível produzir MBT sem comprometer o seu desempenho desde que esteja garantido um eficiente controlo da qualidade.

4.4.6. Resistência ao Fendilhamento por Fadiga

Depois de se avaliar a rigidez, foram determinadas as características de desempenho relacionadas com a resistência à fadiga das misturas (EN 12697-24). Os ensaios para determinação do módulo de rigidez (ensaios de flexão em 4 pontos) foram realizados nas mesmas condições apresentadas no Subcapítulo 3.6.5, mas agora sobre provetes retirados do

trecho experimental. A partir dos resultados dos ensaios de fadiga para cada viga retirada do trecho foi possível determinar a lei de fadiga de cada mistura, de acordo com a Equação 3.3, cujos gráficos são apresentados na Figura 4.12 para as três misturas betuminosas em estudo.

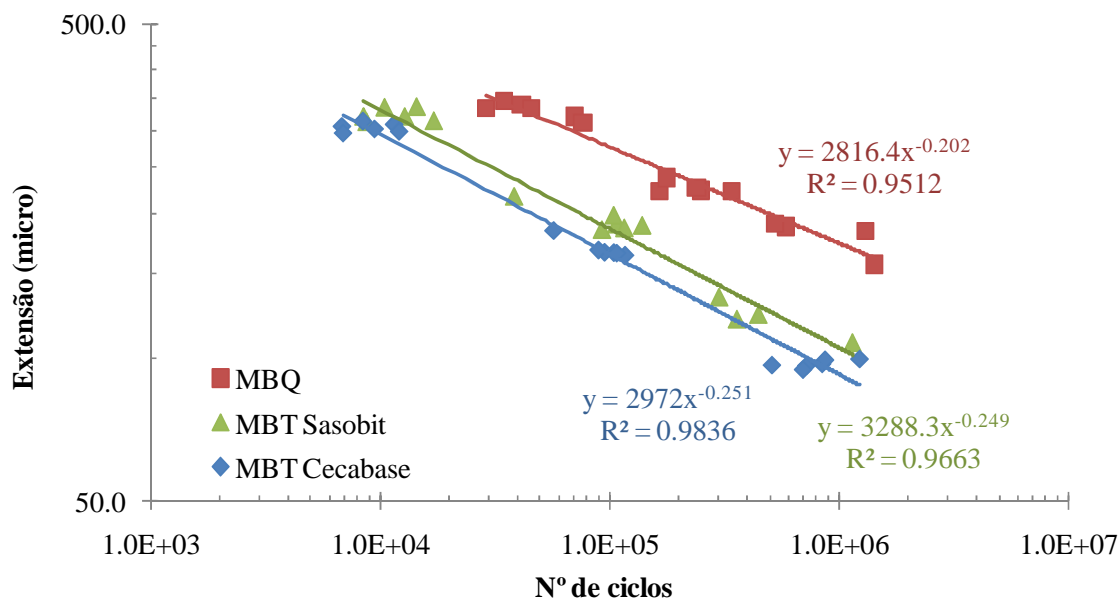


Figura 4.12 – Leis de fadiga obtidas para as misturas betuminosas colocadas no trecho

A mistura convencional MBQ tem uma vida à fadiga muito superior às misturas MBT, e a mistura com Sasobit® é a que tem melhor desempenho no grupo das misturas temperadas. Embora se mantenha a mesma hierarquia de resultados, houve um aumento significativo da vida à fadiga da mistura MBQ por comparação com os resultados de laboratório. Este resultado não pode ser dissociado da acentuada redução do módulo desta mistura verificada anteriormente.

Os valores de ε_6 (resistência à fadiga) obtidos a uma temperatura de 20 °C e a 10 Hz foram 173E-6 para a mistura MBQ, 105E-6 para a mistura MBT com Sasobit® e 93E-6 para a mistura MBT com Cecabase® (valores reduzidos, que devem resultar mais uma vez dos agregados utilizados).

Em resumo, o desempenho das diferentes misturas betuminosas aplicadas no trecho em relação à fadiga foi alterado pela contaminação com fuel, havendo um claro aumento da vida à fadiga da MBQ.

4.4.7. Caracterização do Betume Recuperado

Habitualmente ocorre um significativo envelhecimento do ligante nas misturas betuminosas durante o seu fabrico e colocação em obra. A utilização de menores temperaturas de produção nas MBT poderá implicar um decréscimo no envelhecimento, o que pode justificar uma melhor vida à fadiga.

De forma a verificar o sucedido com as misturas betuminosas aplicadas no trecho experimental deste estudo, julgou-se adequado analisar a evolução das propriedades do ligante antes da sua incorporação nas misturas betuminosas (recolhido à saída da cisterna abastecedora) e após a sua recuperação das misturas aplicadas no trecho pelo método do evaporador rotativo, de acordo com a norma EN 12697-3.

A caracterização final dos ligantes inclui ensaios de penetração a 25 °C (de acordo com a norma EN 1426) e ensaios de ponto de amolecimento (também conhecido por anel e bola, em cumprimento com a norma EN 1427). Os resultados obtidos na caracterização dos ligantes são apresentados no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Valores da caracterização dos ligantes antes e após recuperação

Propriedade	Norma de ensaio	Antes/Após Recuperação	MBQ 50/70	MBT 50/70 Sasobit®	MBT 50/70 Cecabase®
Penetração (0,1mm)	EN 1426	Antes da recuperação	52	33	51
		Após recuperação	47	58	61
Anel e Bola (°C)	EN 1427	Antes da recuperação	50	88	48
		Após recuperação	53	52	48

Face à análise dos resultados obtidos não é possível estabelecer qualquer relação relativa ao envelhecimento do ligante antes e após recuperação das misturas betuminosas. De facto, verifica-se que houve um aumento da penetração nos ligantes recuperados das misturas MBT, ao contrário do que seria esperado devido ao envelhecimento. Mais uma vez, e face à análise dos resultados indicados no Quadro 4.6, confirma-se que os mesmos apenas podem ser explicados com a presença de fuel no ligante após contaminação das misturas pelo excesso de fuel existente no queimador.

4.5. Caracterização Estrutural do Trecho Experimental

4.5.1. Descrição da Localização dos Sub-trechos Efectuados com as Misturas em Estudo

A localização do trecho experimental onde foram aplicadas as diferentes misturas betuminosas em estudo, obtida com GPS, é a apresentada na Figura 4.13.

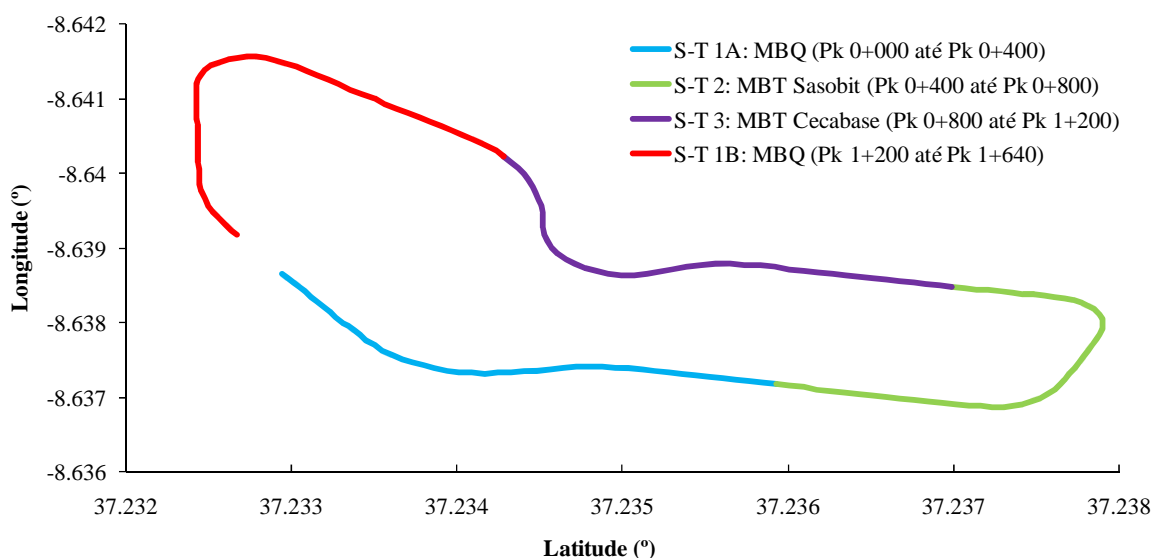


Figura 4.13 – Localização GPS do trecho e das várias misturas betuminosas colocadas ao longo da sua extensão

Pode verificar-se que o trecho se encontra dividido em 4 sub-trechos com uma extensão aproximada de 400 metros cada, sendo que inicialmente se aplicou a MBQ, seguindo-se a aplicação da primeira MBT com Sasobit[®]. A MBT com Cecabase[®], e o final do trecho com uma segunda aplicação da mistura betuminosa convencional MBQ, apenas foram colocadas no dia seguinte.

4.5.2. Ensaios de Capacidade de Carga Efectuados Antes de Aplicar a Camada de Desgaste

Para a caracterização estrutural do pavimento foram realizados ensaios de capacidade de carga com o deflectómetro de impacto (*Falling Weight Deflectometer*, FWD) ao longo das rodéiras externas do trecho experimental (via única). A primeira campanha de ensaios, efectuada antes de colocar a camada de desgaste, foi executada pela Universidade do Minho em Dezembro de 2008.

O deflectómetro de impacto, que se apresenta na Figura 4.14, é um equipamento para a execução de ensaios de capacidade de carga não destrutivos, que aplica na superfície do pavimento uma dada carga de impacto resultante da queda de uma massa a uma determinada altura. Os deslocamentos verticais da superfície do pavimento induzidos por aquela carga (65 kN) são medidos em vários pontos, através de geofones nela apoiados. A placa circular de transmissão da carga seleccionada foi a de 30 cm de diâmetro. As deflexões foram medidas no centro da placa de carga (deflexão máxima) e às distâncias do centro, em mm, de 300, 450, 600, 900, 1200, 1500, 1800 e 2100.



Figura 4.14 – Equipamento utilizado nos ensaios de capacidade de carga (FWD)

Na Figura 4.15 apresentam-se os resultados obtidos com o FWD para o trecho experimental antes de executar a camada de desgaste. O intervalo entre os pontos ensaiados é de cerca de 25 metros. A mesma figura apresenta ainda os valores máximos de deflexão obtidos nos diversos pontos, sendo ainda representada a deflexão característica (correspondente ao percentil 85) para cada um dos sub-trechos da via.

A avaliação da redução percentual da deflexão máxima característica de cada sub-trecho após realização da camada de desgaste irá permitir avaliar, de forma qualitativa, o sucesso estrutural obtido com cada mistura betuminosa colocada no trecho.

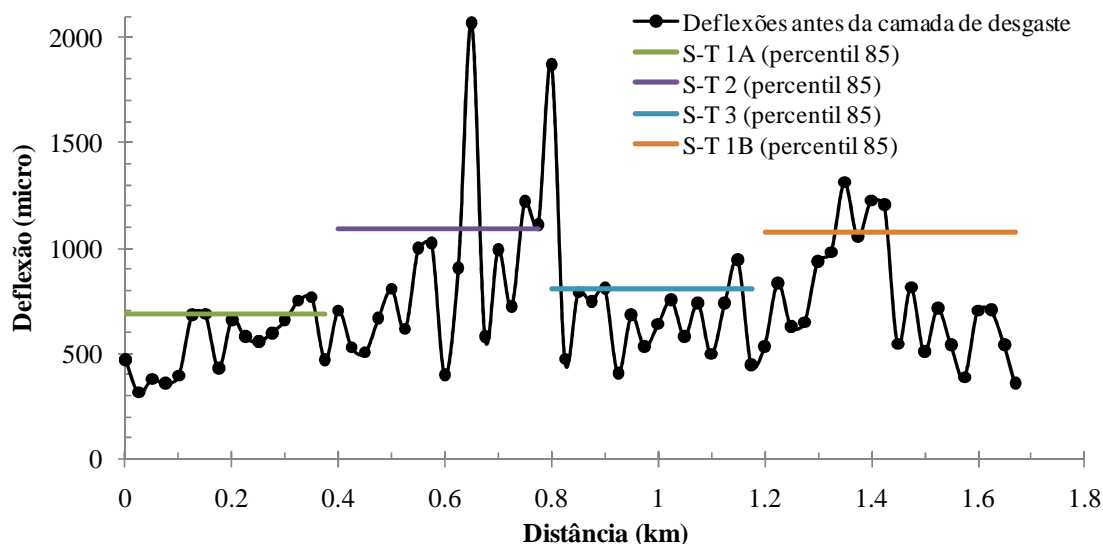


Figura 4.15 – Deflexões máximas do trecho e deflexões características dos sub-trechos antes de realizar a camada de desgaste

Apesar dos valores máximos das deflexões serem relativamente homogêneos ao longo do trecho, alguns problemas pontuais (escorregamento, em especial no trecho S-T 2 com Sasobit®) originam uma variação significativa dos valores característicos da deflexão.

4.5.3. Ensaio de Capacidade de Carga Efectuados Depois de Aplicar a Camada de Desgaste

Na Figura 4.16 apresentam-se os resultados obtidos com o FWD para o trecho experimental depois de executar a camada de desgaste. O intervalo entre os pontos ensaiados continua a ser de cerca de 25 metros (dado que se realizaram os ensaios nos mesmos locais ensaiados anteriormente). Na Figura 4.16 apresentam-se os valores máximos de deflexão obtidos nos diversos pontos após realização da camada de desgaste, sendo ainda representada a deflexão característica (correspondente ao percentil 85) para cada um dos sub-trechos da via.

Verifica-se uma redução significativa do valor da deflexão após construção da camada de desgaste. Mais uma vez, verifica-se que os valores máximos das deflexões são relativamente homogêneos ao longo do trecho, mantendo-se os problemas pontuais a nível estrutural (que, desta forma, se confirma serem resultantes de fragilidades ao nível da fundação) que originam uma variação significativa dos valores característicos da deflexão. No entanto, essa variação é consistente com a observada antes de construir a camada de desgaste.

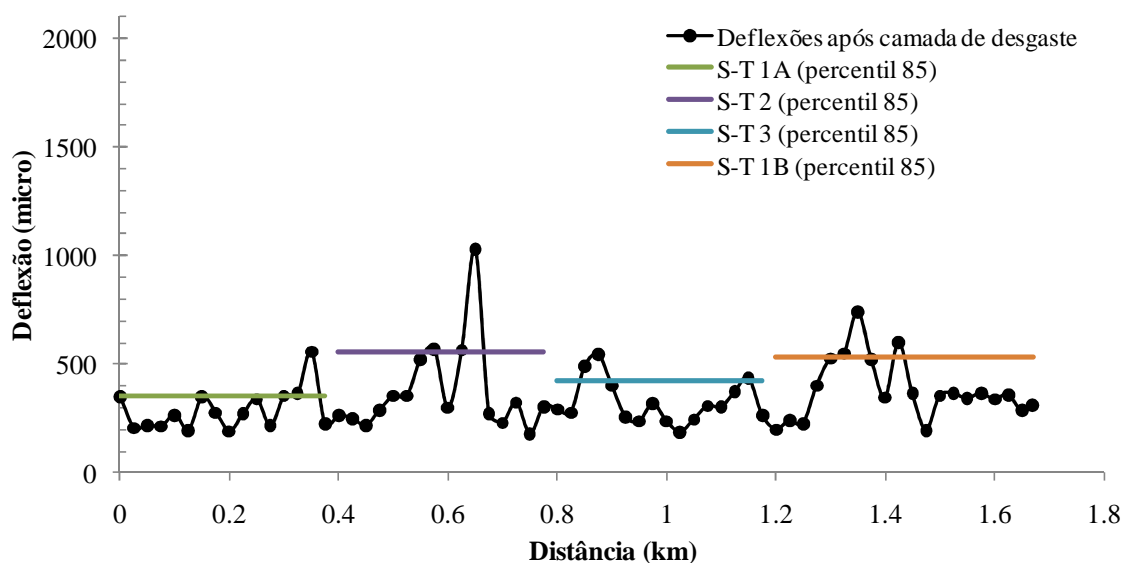


Figura 4.16 – Deflexões máximas do trecho e deflexões características dos sub-trechos após realização da camada de desgaste

Para avaliar o ganho estrutural resultante de cada mistura aplicada no trecho, na camada de desgaste, de forma a ser possível comparar as misturas temperadas (MBT) com a mistura convencional (MBQ), determinou-se a redução percentual da deflexão característica de cada sub-trecho que foi obtida após construção da camada de desgaste. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 – Relação entre os valores da deflexão nos sub-trechos antes e após construção da camada de desgaste

Sub-trecho	S-T 1A (MBQ)	S-T 2 (MBT Sasobit®)	S-T 3 (MBT Cecabase®)	S-T 1B (MBQ)
Deflexão máxima característica (antes da camada de desgaste)	686	1088	804	1079
Deflexão máxima característica (depois da camada de desgaste)	353	555	428	530
Relação entre os valores da deflexão	51%	51%	53%	49%

Pela análise dos resultados verifica-se que as diversas misturas betuminosas colocadas no trecho experimental têm um contributo estrutural muito semelhante. De facto, os valores obtidos para a relação entre os valores da deflexão nos sub-trechos antes e após construção da camada de desgaste são praticamente iguais (49 a 53%) em todos os sub-trechos. Assim, pode concluir-se que as misturas MBT têm uma contribuição estrutural muito semelhante à mistura MBQ, dado que a espessura das camadas também é muito uniforme em todo o trecho.

4.6. Caracterização Funcional do Trecho Experimental

4.6.1. Introdução e Descrição do Equipamento Utilizado

Neste trabalho fez-se uma das primeiras aplicações da tecnologia de produção de misturas betuminosas temperadas em Portugal, sendo que estas misturas foram aplicadas em diferentes camadas de desgaste (sub-trechos) dum mesmo trecho experimental efectuado com as três misturas em estudo (MBQ, MBT Sasobit[®] e MBT Cecabase[®]).

Nestas condições, considerou-se importante avaliar se existem diferenças nas características funcionais das novas misturas MBT aplicadas na camada de desgaste deste trecho, por comparação com a mistura convencional MBQ.

Embora não fosse espectável que essas diferenças ocorressem duma forma muito acentuada (dado que se utilizou a mesma granulometria para produção das diferentes misturas), poderiam existir diferenças na textura e na regularidade devido à aplicação das misturas MBT a menores temperaturas. Assim, esta parte do estudo é importante para validar a aplicação das MBT em camadas de desgaste com adequadas características funcionais.

O equipamento utilizado neste trabalho para caracterização da regularidade longitudinal e da textura é um equipamento do tipo “Multifunções”, da Universidade do Minho e da Universidade de Coimbra, e que foi desenvolvido pela *Dynatest* (Dinamarca).

Este equipamento é composto por uma barra rígida que se encontra fixada no pára-choques dianteiro de um veículo, por um sistema de medição da velocidade fixado numa das rodas e por um sistema de aquisição, controlo e tratamento de dados (Figura 4.17). A barra rígida é dotada de 5 lasers, 2 acelerómetros e de um sensor inercial de movimento (*inertial motion sensor*) os quais permitem medir:

- o perfil longitudinal ao longo das rodeiras esquerda e direita e entre estas duas;
- o perfil transversal definido por 5 pontos;
- a inclinação longitudinal e transversal da estrada;
- o raio de curvatura da estrada;
- a macrotextura do pavimento, definida pela profundidade média do perfil (MPD), ao longo das rodeiras esquerda e direita;

- a irregularidade longitudinal, definida pelo índice internacional de irregularidade que na terminologia anglo-saxónica é designado por *International Roughness Index* (IRI), ao longo das rodadas esquerda e direita e entre estas duas.

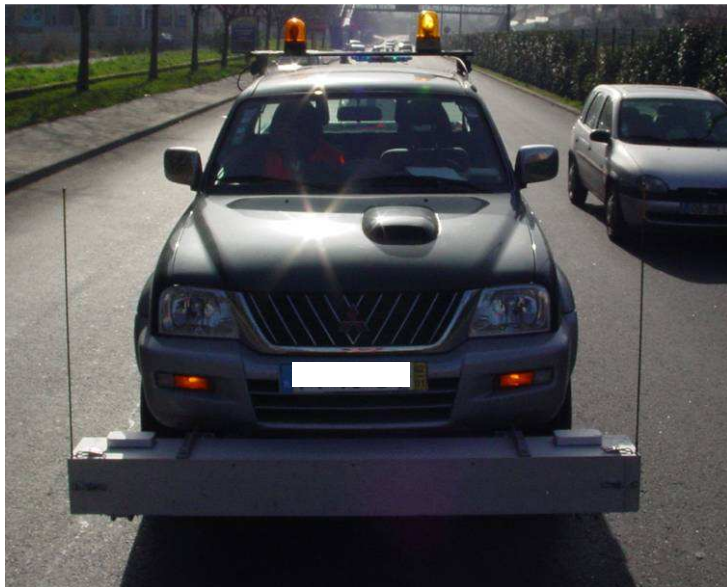


Figura 4.17 – Equipamento usado para a medição do IRI e da MPD

O sistema de aquisição, controlo e tratamento de dados garante a fiabilidade dos resultados para velocidades de ensaio superiores a 20 km/h e inferiores as 120 km/h. Todavia, não devem ser realizadas medições com a superfície do pavimento molhada devido à interferência da água nas medições realizadas pelos laser.

4.6.2. Caracterização da Regularidade Longitudinal

O IRI foi definido pela primeira vez no fim dos anos 70 nos Estados Unidos, tendo sido depois simplificado e normalizado (ASTM E 1364-95) pelo Banco Mundial.

A definição matemática deste índice é fundamentada no modelo do “quarto de veículo” (Figura 4.18). O IRI é um indicador que descreve os movimentos da suspensão de um quarto do veículo, submetido às solicitações devidas aos defeitos de regularidade de um pavimento, quando o quarto de veículo se desloca à velocidade de 80 km/h.

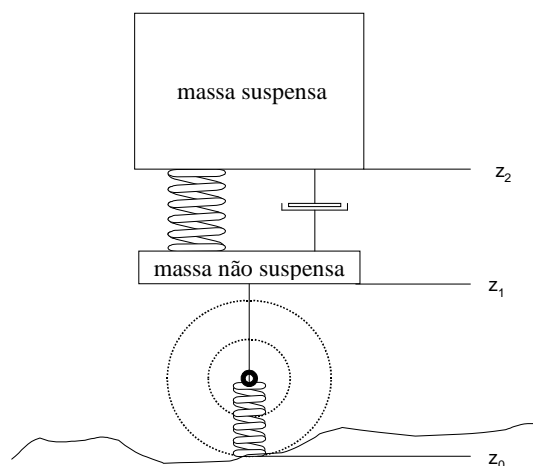


Figura 4.18 – Modelo conceitual para o cálculo do IRI (“quarto de veículo”)

Os dados considerados pelo modelo são um conjunto de informações que descrevem as constantes das molas e amortecedores, assim como da massa suspensa (corpo do veículo) e não suspensa (pneu), que actuam sobre o pavimento.

A definição do índice IRI é dada pela Equação 4.1:

$$IRI = \frac{1}{B} \times \int_1^B |z_2(x) - z_1(x)| dx \quad (4.1)$$

onde:

- B é a base de cálculo (comprimento em metros);
- x é a abcissa sobre o perfil;
- z é a diferença de cotas.

Assim, o IRI é medido a partir do perfil longitudinal e representa os deslocamentos acumulados da suspensão de um veículo tipo, simulados pelo modelo de “quarto de veículo”, os quais são divididos pela distância percorrida durante o ensaio, tendo por unidades m/km.

Os Cadernos de Encargos adoptaram o IRI para a classificação dos pavimentos quanto à regularidade longitudinal. No Quadro 4.8 apresentam-se os 5 níveis de classificação e a correspondente descrição dos limites a cumprir.

Para os limites de IRI propostos deve ser comparada a percentagem de valores calculada a partir da média dos valores de IRI obtidos nas rodéiras esquerda e direita de cada via de tráfego.

Quadro 4.8 – Classificação dos pavimentos com base no IRI

Classificação	Condições a cumprir
Muito Bom	Excede largamente os parâmetros exigidos
Bom	Cumprir os parâmetros exigidos excepção feita à percentagem da extensão do traçado com valores inferiores a 3,0, que deverá ser superior ou igual a 95%
Razoável	Cumprir os parâmetros exigidos, excepção feita às percentagens de extensão do traçado com valores inferiores a 1,5 e 3,0, onde se admitem respectivamente as percentagens de 40 e 90
Medíocre	Não cumpre as exigências anteriores, mas apresenta valores de IRI de 1,5; 2,5 e 3,0 em percentagens do traçado superiores a 15, 60 e 85, respectivamente
Mau	Não cumpre os parâmetros exigidos nas classificações anteriores

No Quadro 4.9 apresentam-se os limites de IRI admissíveis, para uma base de cálculo de 100 m, e a correspondente percentagem mínima da extensão/pontos para as camadas de desgaste betuminosas.

Quadro 4.9 – Valores admissíveis de IRI (m/km), calculados por troços de 100 metros em pavimentos com camadas de desgaste betuminosas

Valor de IRI (m/km)	Percentagem da extensão da obra
$\leq 1,5$	50%
$\leq 2,5$	80%
$\leq 3,0$	100%

No Quadro 4.10 apresentam-se os valores de IRI, para uma base de cálculo de 100 m, obtidos nas rodéiras esquerda (Rod. Esq.) e direita (Rod. Dir.) e no centro (Centro), e a média dos valores das rodéiras esquerda e direita (Média E/D), para o trecho experimental em estudo.

Também se apresenta a posição de cada sub-trecho onde foram colocadas diferentes camadas, de modo a compreender a sua possível influência no valor do IRI. No Quadro 4.10, a posição 0+050 km corresponde ao primeiro segmento de 100 m, e assim consecutivamente para os restantes troços de 100 m.

Quadro 4.10 – Valores de IRI obtidos no trecho experimental

Sub-trecho	PK	Rod. Esq.	Centro (m/km)	Rod. Dir.	Média E/D (m/km)
S-T 1A (MBQ)	0+050	2,89	2,71	2,56	2,72
	0+150	1,24	1,24	1,30	1,27
	0+250	1,08	0,97	1,04	1,06
	0+350	1,35	1,10	0,98	1,16
S-T 1A (MBT Sasobit)	0+450	1,29	1,19	1,09	1,19
	0+550	4,26	2,12	6,26	5,26
	0+650	3,26	3,54	8,28	5,77
	0+750	1,29	1,75	1,42	1,36
S-T 3 (MBT Cecabase)	0+850	2,58	1,97	2,15	2,37
	0+950	2,75	1,92	1,54	2,14
	1+050	1,17	0,96	1,14	1,16
	1+150	1,25	1,49	1,39	1,32
S-T 1B (MBQ)	1+250	1,29	1,11	1,39	1,34
	1+350	2,18	1,96	2,10	2,14
	1+450	1,43	1,46	4,43	2,93
	1+550	0,93	0,86	0,81	0,87

Os valores de IRI indicados anteriormente são igualmente apresentados na Figura 4.19 de forma a facilitar a análise visual das diferenças de irregularidade entre o rodado esquerdo e direito e o centro da via correspondente ao trecho experimental (construído apenas numa via). Ao mesmo tempo, também será possível verificar quais os sub-trechos (e respectivas misturas em análise) em que ocorreram maiores valores de IRI.

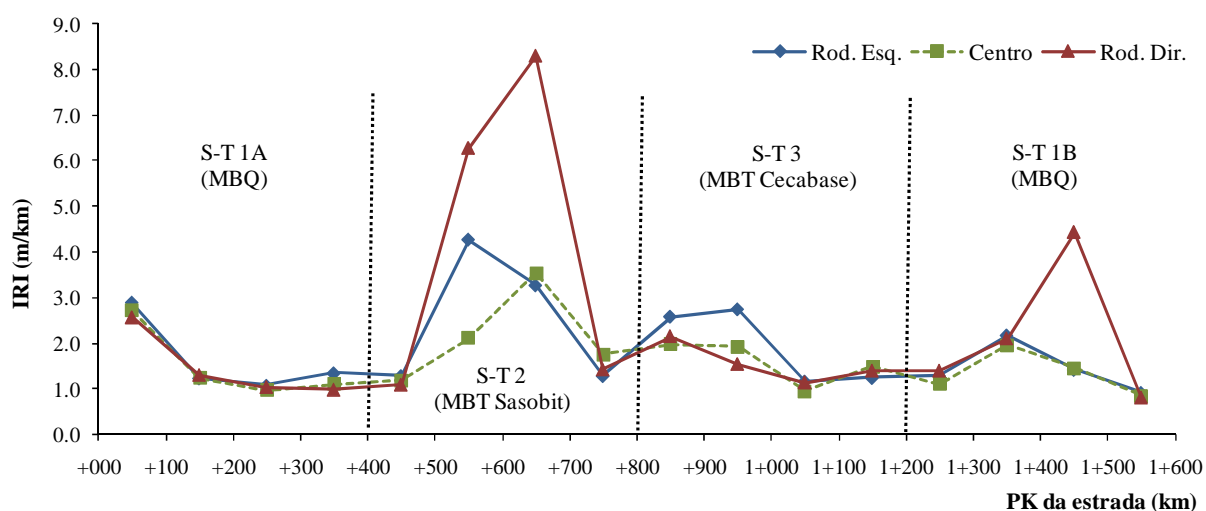


Figura 4.19 – IRI por troços de 100 m no trecho experimental

Ao analisar os resultados do IRI verificou-se que o andamento parece ser influenciado pelo traçado da estrada e pelas singularidades existentes, mais do que pelo tipo de mistura aplicada

na camada de desgaste. De uma forma geral, verifica-se que nas zonas em recta os valores de IRI são baixos e regulares, enquanto em curva se observa uma maior variabilidade. Em determinadas zonas os valores de IRI excedem largamente o limite máximo preconizado no Caderno de Encargos, particularmente no rodado direito da via em análise (entre o Pk 0+500 e 0+700 e entre o ponto Pk 1+400 e 1+500).

A principal causa destes valores elevados de IRI foi a ocorrência dum deslizamento de terras do aterro que dava suporte ao pavimento, pelo que não se pode inferir que a mistura betuminosa aplicada nessas zonas tenha originado o aumento do valor do IRI.

De facto, ao comparar o valor médio do IRI nos diferentes sub-trechos em que foram aplicadas as misturas em estudo, verificou-se que o valor do IRI no sub-trecho com MBT com Sasobit era claramente superior aos restantes sub-trechos. No entanto, dado que no início e no final deste sub-trecho o valor do IRI é semelhante ao obtido com os outros materiais, pode concluir-se que o aumento da irregularidade foi causado por problemas estruturais (por exemplo, estabilidade de taludes) e não por falta de regularidade devido a uma compactação a temperaturas mais baixas.

No sentido transversal, observa-se uma variabilidade que atinge frequentemente valores superiores a 0,5 m/km, como se verifica comparando em cada ponto os resultados obtidos nas rodeiras esquerda, centro e direita (obtendo-se normalmente valores mais elevados na rodeira direita).

Para a classificação de cada via quanto à regularidade, foram considerados os limites de IRI e as correspondentes percentagens mínimas de extensão admissíveis. Para a determinação das percentagens de extensão dentro de cada limite, contou-se o número de pontos cujo IRI se encontra dentro desse limite e dividiu-se pelo número total de pontos.

No Quadro 4.11 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos para a totalidade do trecho experimental, de forma a classificá-lo quanto à sua regularidade (na rodeira esquerda e direita e no centro da via). Além disso, apresenta-se a classificação final obtida para a via em estudo com base na média das rodeiras esquerda e direita.

Quadro 4.11 – Classificação da regularidade do trecho experimental com base no IRI

IRI (m/km)	Percentagem da extensão (%)				Caderno de Encargos
	Rod. Esq.	Centro	Rod. Dir.	Média (Esq., Dir.)	Média (Esq., Dir.)
$\leq 1,5$	63%	56%	56%	56%	$\geq 50\%$
$\leq 2,5$	69%	88%	75%	75%	$> 80\%$
$\leq 3,0$	88%	94%	81%	88%	100%
$> 3,0$	12%	6%	19%	13%	-
Classificação	Medíocre	Razoável	Mau	Medíocre	Medíocre

Como se pode comprovar, comparando as percentagens de extensão calculadas com as admissíveis, o trecho experimental obtém uma classificação de Medíocre. Este valor resulta essencialmente de problemas verificados no rodado direito da via em estudo (classificado de Mau), onde existem alguns locais com escorregamentos de terras nos taludes e outros com reparações.

De facto, a não ocorrerem esses problemas (apresentados no Quadro 4.12), a via poderia ser classificada como tendo uma regularidade Razoável, o que seria espectável no tipo de via utilizada para realização do trecho experimental.

Quadro 4.12 – Singularidades observadas no trecho experimental

Localização	Singularidade observada
0+090; 0+223; 0+541; 0+788; 0+900; 1+565; 1+606	Sujidade
0+118; 0+519; 0+602; 0+647; 1+043	Reparação
0+515; 0+583; 0+635; 0+704; 1+386; 1+465	Curva
0+566; 0+590; 0+750; 0+806; 0+943; 1+138; 1+616	Tampa
0+638	Escorregamento

4.6.3. Caracterização da Textura

A textura da superfície de um pavimento é determinante para factores tais como a produção de ruído resultante da interacção pneu/pavimento, o atrito entre os pneus e a estrada, a resistência de rolamento e o desgaste dos pneus.

O método da “mancha volumétrica”, também designado por “mancha de areia”, tem sido utilizado durante décadas para calcular um único valor representativo da textura da superfície.

Este método baseia-se no espalhamento sobre uma superfície de um determinado volume de areia ou de esferas de vidro, de modo a formar uma mancha circular, medindo-se o respectivo diâmetro. Através da divisão do volume do material espalhado pela área da superfície resultante obtém-se um valor que representa a profundidade média da camada de areia ou de esferas de vidro, isto é a “profundidade média da textura” (Figura 4.20).

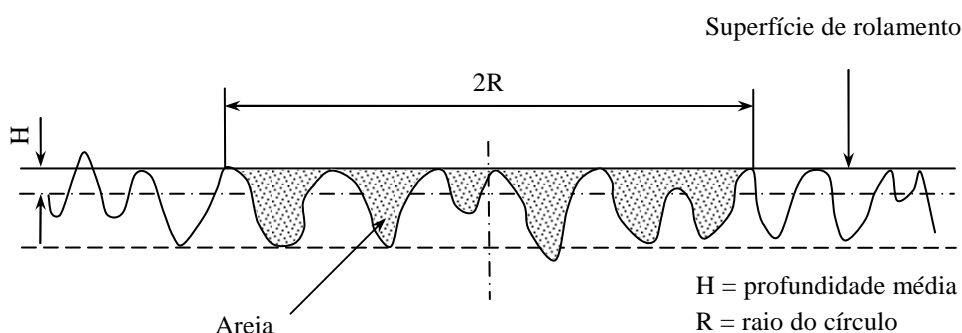


Figura 4.20 – Ilustração do princípio do método da mancha de areia

A partir dos desenvolvimentos das técnicas de medição sem contacto do perfil de uma superfície, passou a ser possível substituir as medições de mancha volumétrica pelas medições resultantes do registo de perfis.

Um perfil de uma superfície é uma representação bidimensional, gerada por um sensor, como a ponta de uma agulha ou laser, que toca ou atinge continuamente a superfície do pavimento, à medida que é movido ao longo do mesmo. Este método é adequado para determinar a Profundidade Média do Perfil (*Mean Profile Depth*, MPD) da superfície do pavimento.

A profundidade média de um perfil com um determinado comprimento de cálculo corresponde à média dos valores obtidos em perfis individuais nele contidos cuja linha de base deve ter $100\text{mm} \pm 10\text{mm}$ de comprimento, conforme se apresenta na Figura 4.21.

Em cada perfil individual, o nível de pico mais elevado sobre cada metade da linha de base deverá ser identificado. De seguida faz-se a média aritmética dos níveis dos dois picos à qual se subtrai o nível médio (do perfil).

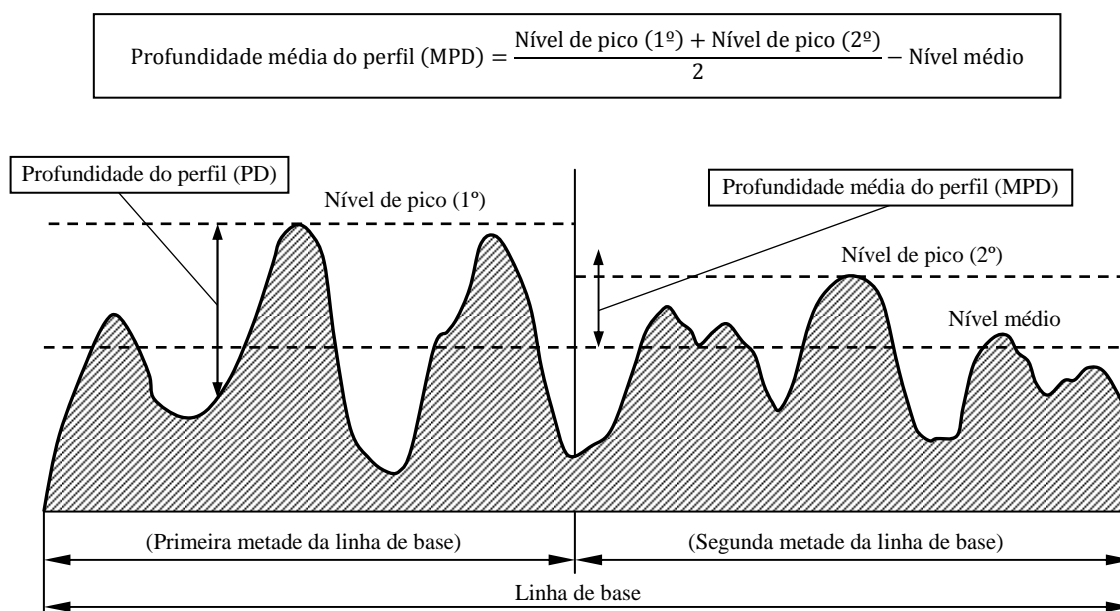


Figura 4.21 – Ilustração dos termos comprimento de base, profundidade do perfil (PD), profundidade média do perfil (MPD)

A Profundidade Média do Perfil (MPD) pode ser convertida numa quantidade que estima a profundidade da macrotextura de acordo com o método volumétrico da mancha. O termo utilizado quando a Profundidade Média do Perfil é usada para calcular a Profundidade Média da Textura (MTD) é a Profundidade Estimada da Textura (*Estimated Texture Depth*, ETD). O valor de MPD pode ser transformado em ETD aplicando a Equação 4.2.

$$\text{ETD} = 0,2 \text{ mm} + 0,8 \times \text{MPD} \quad (4.2)$$

sendo ETD e MPD expressos em milímetros.

Os cadernos de encargos preconizam limites mínimos para a profundidade média da textura (MTD), também designada por altura de areia (Quadro 4.13). Dado que neste trabalho apenas se determinou a textura com o equipamento “Multifunções”, que só permite determinar o valor de ETD, vai-se considerar estes mesmos limites para essa propriedade (ETD).

Para a caracterização da textura superficial da camada de desgaste, o Caderno de Encargos preconiza a sua medição em contínuo e pontual, recorrendo a equipamentos tipo laser e através do método da “mancha de areia”, respectivamente. Neste trabalho apenas foi possível realizar a medição em contínuo.

Quadro 4.13 – Limites mínimos de MTD para diferentes tipos de misturas betuminosas

Tipo de mistura betuminosa	Altura de areia/MTD (mm)
Betão betuminoso (mistura aplicada no trecho)	Aa/MTD > 0,6
Betão betuminoso drenante	Aa/MTD > 1,2
Microbetão rugoso	Aa/MTD > 1,0
Argamassa betuminosa	Aa/MTD > 0,4
Mistura betuminosa de alto módulo	Aa/MTD > 0,4

Para a medição da textura em contínuo foi utilizado o equipamento do tipo Multifunções descrito anteriormente. A profundidade média do perfil foi calculada em perfis com 20 m de comprimento ao longo das rodeiras direita e esquerda da via em estudo (trecho experimental).

No Quadro 4.14 apresenta-se a profundidade média do perfil (MPD) e a correspondente profundidade estimada da textura (ETD) determinada para verificação dos limites mínimos preconizados no Caderno de Encargos (apenas se apresentam os valores médios obtidos para cada sub-trecho, de modo a ser possível comparar os materiais aplicados). Na Figura 4.22 apresenta-se a ETD, respectivamente, na rodeira esquerda e direita do trecho experimental.

Quadro 4.14 – Profundidade da textura no trecho experimental em estudo

Sub-trecho	Pk	MPD (mm)		ETD (mm)	
		Esq.	Dir.	Esq.	Dir.
1A (MBQ)	0+000 a 0+400	0,46	0,49	0,56	0,59
2 (MBT Sasobit)	0+400 a 0+800	0,46	0,53	0,57	0,62
3 (MBT Cecabase)	0+800 a 1+200	0,45	0,52	0,56	0,62
1B (MBQ)	1+200 a 1+600	0,61	0,63	0,69	0,71

De uma forma geral, verifica-se uma grande homogeneidade dos resultados, quer entre os vários tipos de misturas quer para a mesma mistura. Observa-se ainda que a EPD apresenta valores superiores na rodeira direita, os quais se afastam um pouco dos valores observados na via esquerda. Ao comparar o valor da textura (ETD) nos diversos sub-trechos, foi possível verificar que a aplicação dos diferentes tipos de misturas a temperaturas muito diversas não interferiu no valor de textura obtido. De facto, os valores médios de ETD para cada sub-trecho são praticamente iguais entre si, com excepção do final do trecho experimental onde foi aplicada, pela segunda vez, a mistura betuminosa a quente.

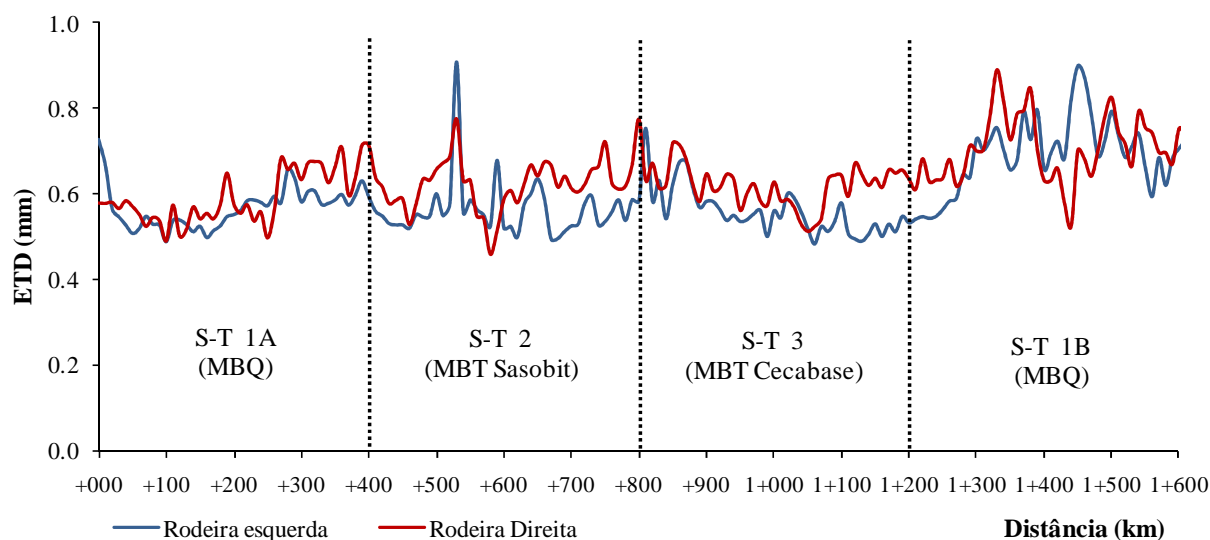


Figura 4.22 – Profundidade estimada da textura no trecho experimental em estudo

Em relação ao cumprimento do valor especificado pelo Caderno de Encargos (ETD deve ser superior a 0,6 mm para a textura deste tipo de misturas Betão Betuminoso), verifica-se que em geral o trecho experimental não cumpre esse valor. No entanto, dado que a via onde foi construído o trecho experimental teve até à data um tráfego muito reduzido que ainda não permitiu “remover” a película de betume superficial da camada de desgaste, será espectável que o valor de ETD aumente com facilidade para valores superiores ao especificado no Caderno de Encargos (dado que os valores mínimos de ETD encontrados nesta fase já são superiores a 0,5 mm).

4.7. Análise Económica da Aplicação de Misturas Betuminosas Temperadas

Este ponto do trabalho pretende fazer uma avaliação sumária dos aspectos económicos associados à produção das misturas betuminosas temperadas aqui estudadas, face à mistura betuminosa convencional produzida a quente.

No que diz respeito às misturas betuminosas temperadas, estas representam um importante passo para o desenvolvimento sustentável, simultaneamente conservando os recursos naturais e reduzindo a pegada de carbono do sector da construção. Contabilizando os preços de mercado, e a redução do CO₂ emitido, poder-se-á retirar uma importante vantagem económica que, generalizando a sua utilização, deveria ser assumida pelas empresas.

Para além deste aspecto fundamental, podem ainda ocorrer reduções de custos advindas das mais baixas temperaturas de produção e, consequentemente, menores consumos de fuel necessários para o aquecimento dos agregados. Também associada à menor temperatura de produção pode obter-se um menor desgaste da central de produção, o que se traduz, igualmente, numa vantagem económica.

No que diz respeito a eventuais aumentos nos custos finais das MBT poderá ser necessário introduzir algumas alterações na central de produção (algumas tecnologias assim o exigem), contabilizando também, custos com aditivos e custos com eventuais licenças no caso de as misturas estarem patenteadas (EAPA, 2009).

Nos parágrafos seguintes apenas se irá avaliar o custo da produção das misturas betuminosas, contemplando o custo extra do aditivo em comparação com o benefício directo resultante da redução de consumo no fuel.

Inicialmente analisaram-se os custos com a aditivação do betume para a percentagem de ligante a introduzir na mistura (5%). Todos os custos com o ligante, apresentados em seguida no Quadro 4.15, são em valor aproximado.

Quadro 4.15 – Análise dos custos com o ligante

Tipo de custo	Unidade	MBQ	MBT Sasobit®	MBT Cecabase®
Ligante na mistura	(%)	5	5	5
Aditivo no ligante	(% /ligante)	-	4%	0,3%
Quantidade de aditivo na mistura	(kg/ton mist)	-	2	0,15
Quantidade de betume na mistura	(kg/ton mist)	50,0	48,0	49,85
Custo do aditivo	(€/ton aditivo)	-	1950	5250
Custo do betume	(€/ton betume)	350	350	350
Custo do ligante aditivado (A)	(€/ton mist)	17,5	207	18,2

Analisando os custos com o ligante, e para a percentagem de betume de 5% a introduzir na mistura betuminosa, verifica-se que existe um acréscimo de custo de 15% para o ligante com Sasobit® e de 3,4% para o ligante com Cecabase®.

Relativamente aos agregados, foi considerado um custo uniforme para as três misturas betuminosas, dado que a composição é análoga nas diversas misturas (Quadro 4.16).

Quadro 4.16 – Análise dos custos com os agregados

Tipo de custo	Unidade	MBQ	MBT Sasobit®	MBT Cecabase®
Custo dos agregados (B)	(€/ton mist)	10,5	10,5	10,5

No que diz respeito ao fabrico das misturas betuminosas consideraram-se os consumos de fuel medidos na central (de forma aproximada) para produção das misturas betuminosas, já descritos anteriormente.

Foi considerado um custo restante para os valores correspondentes à amortização da central, montagem e desmontagem (entre outros) e que foi considerado fixo para as três misturas produzidas. O Quadro 4.17 resume os custos de produção estimados para as três misturas betuminosas em estudo.

Quadro 4.17 – Análise dos custos durante a fase de fabrico

Tipo de custo	Unidade	MBQ	MBT Sasobit®	MBT Cecabase®
Custo do fuel	(€/ton)	400	400	400
Consumo de fuel	(kg/ton mist)	6,0	4,5	4,0
Custo de fuel (1)	(€/ton mist)	2,4	1,8	1,6
Restantes custos de produção (2)	(€/ton mist)	4,87	4,87	4,87
Total de custos no fabrico (C=1+2)	(€/ton mist)	7,27	6,70	6,47

Assim, foi possível verificar que o custo da produção das duas misturas betuminosas temperadas é idêntico, sendo que a mistura betuminosa a quente tem um acréscimo de custo de produção associado ao consumo de fuel de 10%.

Finalmente, procedeu-se ao cálculo do custo total das misturas betuminosas produzidas no âmbito deste estudo, que se obtêm da soma das parcelas de custos relativas aos materiais constituintes (agregados e ligante, ou A + B), juntamente com os custos de fabrico (C). O Quadro 4.18 apresenta os custos finais estimados para as três misturas betuminosas em estudo.

Quadro 4.18 – Análise dos custos totais das misturas betuminosas

Tipo de custo	Unidade	MBQ	MBT Sasobit®	MBT Cecabase®
Ligante (A)	(€/ton mist)	17,5	20,7	18,2
Agregados (B)	(€/ton mist)	10,5	10,5	10,5
Fabrico (C)	(€/ton mist)	7,27	6,7	6,47
Custo total da mistura (A+B+C)	(€/ton)	35,3	37,9	35,2

No Quadro anterior pode constatar-se que o custo da mistura betuminosa temperada produzida com Cecabase® é análogo ao da mistura betuminosa convencional a quente, dado que o custo adicional com o aditivo é compensado pela redução no consumo de fuel para aquecimento dos agregados. O custo da mistura betuminosa temperada produzida com Sasobit® mostra-se ligeiramente superior (7%) ao das misturas já referidas. Esta conclusão está de acordo com o descrito na literatura internacional existente sobre a matéria, que refere que os custos de produção esperados para as misturas betuminosas temperadas devem ser similares ou apenas ligeiramente superiores aos das MBQ (EAPA, 2008).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1. Introdução

Já há cerca de 15 anos, Porter e van der Linde (1995) afirmavam que “não existe incompatibilidade entre desenvolvimento empresarial ou competitividade e preservação ambiental, sendo conciliáveis e, até complementares. A protecção ambiental terá uma dimensão económica que se traduz por incentivos à reestruturação e inovação no seio das empresas, induzindo melhorias de produtividade e eficiência no uso dos recursos, podendo, em última estância, conduzir a reduções de custos que acabarão por tornar as empresas mais competitivas, e não menos, como alega a maioria dos empresários”.

Esta afirmação resume de uma forma realista a importância do conceito de preservação ambiental à escala das organizações. O acrescido enfoque que tem sido dado ao uso racional da energia e à pegada de carbono estimula o interesse nas novas tecnologias para redução dos consumos (menos energia, menos CO₂) e o provimento para encorajar a sua utilização.

Discutiram-se por estes dias, em Copenhaga, na 15th *United Nations Climate Change Conference* (COP15), as metas globais de emissões para os próximos anos, sendo que os aspectos associados a esta temática ganharão uma importância crescente.

As misturas betuminosas temperadas podem ser uma solução eficaz, traduzindo-se na resposta adequada do sector de produção de misturas betuminosas ao repto da redução da Pegada de Carbono.

As normas europeias relativas às especificações para o betão betuminoso (normas da família EN 13108-1 a 7) foram recentemente publicadas e permitem contemplar as misturas betuminosas temperadas, uma vez que definem temperaturas distintas para misturas contendo aditivos, podendo o produtor declarar, desde que comprovado o desempenho da mistura, temperaturas mínimas diferentes das declaradas na norma, dando desta forma viabilidade à produção deste tipo de misturas.

5.2. Conclusões

No caso das misturas betuminosas temperadas, a análise de todo seu interesse a uma escala global deve ser realizada, como em todas as opções tecnológicas, no final do ciclo de vida do pavimento, e como tal é imprescindível comprovar o desempenho equivalente deste tipo de misturas com as misturas betuminosas a quente.

O objectivo principal deste trabalho concentrava-se na análise comparativa do desempenho mecânico (em laboratório e num trecho experimental) de uma mistura betuminosa produzida a temperaturas convencionais, e da mesma mistura produzida com duas diferentes tecnologias para produção de misturas betuminosas temperadas, nomeadamente através da introdução de dois aditivos distintos (ceras sintéticas e agentes de superfície).

Não existindo critérios de formulação das misturas betuminosas temperadas, foi feito um estudo pormenorizado dos ligantes utilizados no sentido de determinar a melhor percentagem de aditivo a incorporar, bem como utilizado o ensaio de compactabilidade para a determinação das temperaturas óptimas de produção das misturas betuminosas temperadas. Demonstrou-se, para além da adequabilidade da metodologia seguida, pela reprodutibilidade dos resultados conseguidos, que seria possível reduzir, com a introdução dos dois aditivos seleccionados, a temperatura de fabrico e compactação das misturas produzidas em cerca de 15 a 35 °C, o que proporciona benefícios ambientais inequívocos.

No que diz respeito ao desempenho das misturas estudadas, foi possível comprovar que, laboratorialmente, a mistura betuminosa a temperaturas convencionais (MBQ) tem um desempenho idêntico ao das misturas betuminosas temperadas (MBT) produzidas a menores temperaturas. Da avaliação da influência da utilização dos aditivos para produção das MBT na afinidade betume agregado, estudo efectuado também no âmbito deste trabalho, resultou que a sua utilização não afecta esta propriedade.

Na validação na produção, para além de ter sido verificada a diminuição do consumo de combustível no queimador de 25 a 30%, foi possível apurar que os valores da resistência à deformação permanente foram cerca de metade dos valores obtidos em laboratório, devido a uma contaminação com fuel no queimador aquando do aquecimento dos agregados.

Esta questão deve ser encarada à luz da maior susceptibilidade para ocorrer este tipo de contaminação ao reduzir a temperatura de fabrico (devido ao eventual excesso de fuel no queimador). Este possível problema das MBT poderá ser solucionado com a implementação de uma metodologia de monitorização do controlo dos aspectos associados à regulação dos queimadores e/ou alteração dos mesmos, para energias de aquecimento distintas, como por exemplo gás natural. Assim sendo, um controlo da qualidade mais rigoroso e focalizado para estes aspectos deve ser implementado na fase de produção e aplicação.

Do ponto de vista social, foi possível obter, por parte dos trabalhadores associados à pavimentação do trecho experimental, uma opinião unânime e favorável na utilização da tecnologia das misturas betuminosas temperadas pela melhoria das condições de trabalho, pese embora a pequena quantidade de misturas aplicadas.

5.3. Trabalhos Futuros

Para o futuro, para além de uma investigação aprofundada do desempenho das misturas betuminosas temperadas a longo prazo, é imprescindível a quantificação dos benefícios obtidos com a sua aplicação, nomeadamente a nível da comparação entre estruturas contendo misturas betuminosas a quente, com e sem incorporação de material fresado, e de misturas betuminosas temperadas com incorporação de material fresado.

A nível nacional parece então impreterível que os Donos de Obra estimulem a utilização destas tecnologias, incentivando e premiando as empresas construtoras que o façam, devido aos benefícios ambientais daí provenientes.

Este trabalho deixa ainda em aberto a possibilidade da criação de uma especificação nacional para uma metodologia de formulação deste tipo de misturas, o que auxiliaria a sua implementação e divulgação no nosso país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chandra K.Akisetty, Soon-Jae Lee, Serji N.Amirkhenian (2007). “High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives”. Int. Journal of Construction and Building Materials.
- Asphalt Institute (1997). Superpave Performance Graded Asphalt Binder Specification and Testing, Superpave Series No. 1 (SP-1), Lexington, Kentucky.
- Astec – Astec Industrie Companie Products (2009)
http://www.astecinc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=117&Itemid=188
- APAO (2003). Warm Mix Asphalt Shows Promise for Cost Reduction, Environmental Benefit, Centerline. The Asphalt Pavement Association of Oregon, Salem.
- Bilal, V. Grosshenny, H. Lecouls, C. Le Noan, J. Marcilloux, J. -F. Quero, F. Verhée et al. (2008). “Caractéristiques environnementales des matériaux routiers”. Journées plénières routes du LCPC, Revue Générale des Routes n° 865.
- Brosseaud, Y., Jacques, M.S. (2008). “Warm asphalt mixes: overview of this new technology in France”. Transport Research Arena Europe, Ljubljana.
- Button, J.W., Estakhri, C., Wimsatt, A. (2007). A Synthesis of Warm-Mix Asphalt. Texas Transportation Institute and Federal Highway Administration. Report 0-5597-1. Texas.
- CECA (2008). Green Road Formulation - Warm Mix Asphalt - Cecabase RT. Arkema Group.
<http://www.cecachemicals.com/sites/ceca/en/business/bitumen_additives/warm_coated_material/warm_coated_material.page> (Accessed on 4Nov08).
- Chowdhury, A., Button, J.W. (2008). “A review of warm mix asphalt”. Texas A&M University System.
- Corrigan, M. (2008). “Warm Mix Asphalt Technologies and Research”. FHWA.
<<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm>> (Accessed on 10Nov08).
- Croteau, P.J., Tessier, B. (2008). “WMA Paving Technology: A road Builder’s Prespective” Annual Conference of the Transportation Association of Canada.
- D’Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R. and Yeaton, B. (2008).

Warm-Mix Asphalt: European Practice. Federal Highway Administration, U.S. DoT, AASHTO, NCHRP, Report no. FHWA PL-08-007, Alexandria.

Dal Bosco, S.M., Jimenez, R.S., Carvalho, W.A. (2004). “Aplicação da Zeólite natural esolecita na remoção de metais pesados de efluentes industriais: competição entre os cátions e processo de dessorção”. *Eclética Química*, Vol. 29, nº 1.

EAPA (2007). “Environmental guidelines on best available techniques (BAT) for the production of asphalt paving mixes”.

EAPA (2009). “The use of warm mix asphalt – Position paper”.

B. Eckmann, D. Chabert, O. Moglia, S. Largeaud, P. Descroix, E. Chailleux, V. Mouillet, H. Soenen, A. Perez Lepe, S. Nigen-Chaidron, L. Champion-Lapalu. (2008). “Module complexe des liants bitumineux”. *Revue Générale des Routes* nº 866.

FHWA (2008). “Warm Mix Asphalt Technologies and Research”. Federal Highway Administration. U.S. DoT.

Fitts, G. (2008). Warm Mix Asphalt: Experience in Texas. 32nd Annual Asphalt Conference, Asphalt Institute.

J.-P. Marchand, S. Soliman, M. Von Devivere, A. Sauget, S. Harnischfeger, W. Barthel (2008). “Performances et évaluation de l’impact environnemental des enrobés bitumineux tièdes à l’aspha-min®”. *Revue Générale des Routes* nº 866.

V. Gaudefroy, C. de la Roche, P. Monéron, R. Paranhos et al. (2008). “Systèmes de mesure d’émissions de fumées pour la caractérisation environnementale d’enrobés bitumineux et bitumes en laboratoire”. *Journées plénières routes du LCPC – Revue Générale des Routes* nº 865.

Hurley, G.C., Prowell, B.D. (2005a). “Evaluation of Aspha-Min® Zeolite for use in Warm mix asphalt”. National Center for Asphalt Technology.

Hurley, G.C., Prowell, B.D. (2005b). “Evaluation of Evotherm® for use in Warm mix asphalt”. National Center for Asphalt Technology.

Hurley, G.C., Prowell, B.D. (2005c). “Evaluation of Sasobit® for use in Warm mix asphalt”. National Center for Asphalt Technology.

Hurley, G.C., Prowell, B.D. (2006). “Evaluation of Potential Processes for use in Warm Mix”. <<http://www.warmmixasphalt.com>> (Accessed on 10Jan09).

- Hurley, G.C., Prowell, B.D. (2008). "Warm Mix Asphalt: Best Practices". National Asphalt Pavement Association. 53rd Annual Meeting.
- Jenkins, K.J. (2000). Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen. PhD Thesis, University of Stellenbosch, South Africa.
- Koenders, B., Stoker, D., Robertus, C., Larsen, O., Johansen, J. (2002). "WAM Foam[®], Asphalt Production at Lower Operating Temperatures". 9th International Conference on Asphalt Pavement, Copenhagen, Denmark.
- Kristjánssdóttir, Ó., Muench, S.T., Michal, L., Blurke, G. (2007). "Assessing Potential for Warm-Mix Asphalt Technology Adoption". Transportation Research Record, No. 2040. Transportation Research Board.
- Larsen, O., Moen, O., Robertus, C., Koenders, B. (2004). "WAM Foam Asphalt Production at Lower Operating Temperatures as an Environmental Friendly Alternative to HMA". Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobitume Conference, Book 1, Foundation Eurasphalt, Breukelen, The Netherlands, pp 641-650.
- LEA-CO (2008) http://www.lea-co.com/lea_co/rubrique.php?page=2&sous_rub=61&id=11
- LCPC (2006). "Manuel LCPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- Maccarrone, S., Holleran, G., Ky, A. (1994). "Cold Asphalt Systems as an Alternative to Hot Mix". 9th AAPA International Asphalt Conference.
- Muthen, K.M. (1998). "Foamed asphalt mixes – mix design procedure". CSIR. <<http://asphalt.csir.co.za/foamedasph/foamasph.pdf>> (Accessed on 23Jan09)
- NCAT (2005). "NCAT Evaluates Warm Mix Asphalt". Asphalt Technology News, Vol. 17, No. 2.
- Nynas (2008). "Reduced temperature asphalts". Nynas Bitumen Magazine: Performance, issue 1.
- Nynas (2009). "Asfalto templado, semi-templado y frío: el caso a favor de la sostenibilidad". Nynas Bitumen Magazine: Performance, issue 1.
- Olard, F., Noan, C. (2008). "PIARC Prize for Sustainable development - Low Energy Asphalts". Routes-Roads N°336/337.

- Park, J.H., Seo, K.K. (2003). "Approximate life cycle assessment of product concepts using multiple regression analysis and artificial neural networks". *KSME International Journal*, Vol. 17, Nº 12, pp. 1969-1976.
- Porter, M.E., Van der Linde, C. (1995). "Toward a New Conception of the Environment - Competitiveness Relationship". *Journal of Economic Perspectives*, Vol. 9, No. 4, pp 97-118.
- Prowell, B.D., Hurley, G.C. (2008). "National Asphalt Pavement Association Warm-Mix Asphalt: Contractors Experiences". *Quality Improvement Series* 125.
- Ripoll, J.O., Farré, C.M. (2007). "Reducción de las emisiones causadas põe la producción y puesta en obra de mezclas bituminosas en caliente". *Jornada técnica ASEFMA – Mezclas Bituminosas El Mercado CE y la normativa de reduccion de emisiones*.
- Ruhl, R., Liendemeier, B. (2006). "Progress Report 2006 - The German Bitumen Forum". *The Germany Bitumen Forum. Issue 2*, Heurich Lanck GmbH, Germany.
- Sasol (2004). "The Bitumen Additive for Highly Stable Easily Compactable Asphalts". *Sasobit® Product Information* 124, Sasol Wax GmbH, Hamburg.
- Sasol (2008). "Sasobit Technology". Sasol Wax GmbH Company, Hamburg. <http://www.sasolwax.com/Sasobit_Technology.html> (Accessed on 4Nov08)
- Shell Bitumes (2006). "Quand les bitumes Shell font campagne pour l'environnement". *Le liant*, no. 38.
- Vaitkus, A., Cygas, D., Laurinavicius, A., Perveneckas, Z. (2009a). "Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania". *The Baltic Journal of road and bridge engineering*, 4(2), pp. 80-86. (1)
- Vaitkus, A., Vorobjovas, V., Ziliute, L. (2009b). "The Research on the use of warm mix asphalt for asphalt pavement structures". *International Baltic Road Conference*. Riga, Lithuania.
- Virta, R. (2008). *Geotimes. Mineral Resource of the Month*.
- You, Z., Goh, S.W. "Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt: A Preliminary Study". *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 1, No. 1.